

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Analýza rizika při vzniku elektrického oblouku

Arc Flash Hazard Analysis

2015

Bc. Petr Vavříček

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Vavříček**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Analýza rizika při vzniku elektrického oblouku**
Arc Flash Hazard Analysis

Zásady pro vypracování:

1. Teorie vzniku el. oblouku a jeho působení na lidský organismus
2. Teorie k analýze rizik při vzniku elektrického oblouku
3. Výpočet zkratového proudu potřebného pro analýzu rizik
4. Stanovení doby vypnutí poruchy pro účely analýzy rizik
5. Provedení analýzy rizika při vzniku el. oblouku na konkrétní prvky průmyslové sítě

Seznam doporučené odborné literatury:

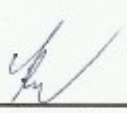
1. ČSN EN 60909: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách
2. IEEE 1584-2002: IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations
3. NFPA 70E-2012: Standard for Electrical Safety in the Workplac
4. Další literatura podle pokynu vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

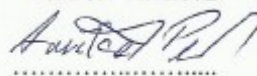
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne:

7.5.2015

.....

Bc. Petr Vavříček



.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za odborné vedení během vypracovávání této práce.

Dále děkuji Ing. Břetislavu Stachovi, Ph.D. za získané teoretické a praktické znalosti v probírané problematice.

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě dne:

28.4.2015

Ing. Břetislav Stacho, Ph.D.


.....

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou rizika při vzniku elektrického oblouku, která je vyžadována zahraniční legislativou při návrhu a provozování elektrických zařízení. Tato problematika není v ČR známa. V úvodních kapitolách je rozebrán elektrický oblouk a jeho účinky na člověka. Stěžejní kapitoly této práce se zabývají popisem analýzy a postupem jakým lze analýzu provést. Detailně jsou rozebrány dva stěžejní vstupní parametry pro analýzu rizik při vzniku elektrického oblouku. Jsou jimi nejvyšší hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu a čas, po který porucha trvá. V závěru práce je provedena praktická ukázka provedení analýzy na konkrétní prvky průmyslové sítě na různých napěťových hladinách.

Abstract

The thesis is deals with the arc flash hazard analysis, which is demanded by foreign legislation in design and operation of electrical equipment. This topic is not known in the Czech Republic. In opening chapters, the arc flash and its impact on a human being are analysed. The main chapters of the thesis deals with description of the analysis and the proces how to make arc flash analysis. Two main input parameters for the arc flash hazard analysis are described and analysed in detail: The highest value of bolted fault current and the time how long the fault lasts. In the conclusion of the thesis, the practical illustration of arc flash hazard analysis on chosen equipment of industrial grid on various voltages is made.

Klíčová slova

elektrický oblouk, analýza rizika, zkrat, ochrany, PowerFactory

Keywords

Arc flash, hazard analysis, short circuit, protections, PowerFactory

Seznam symbolů a zkratk

1f	jednofázový	
2f	dvoufázový	
3f	třífázový	
ČSN	Česká technická norma	
HRC	Hazard Risk Category	
HV	HighVoltage	
IT	izolovaná síť	
IEC	International ElectrotechnicalCommission	
LV	LowVoltage	
MaR	měřicí a řídicí technika	
nn	nízké napětí	
OOPP	osobní ochranné pracovní pomůcky	
PPE	Personal Protective Equipment	
SF ₆	Fluorid sírový	
TN	přímo uzemněná síť	
TT	síť uzemněná přes impedanci	
UV	ultrafialové záření	
VN	vysoké napětí	
A	počáteční hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	[A]
E	napětí ekvivalentního zdroje	[V]
I_{2K}''	minimální hodnota zkratového proudu 2f zkratu	[A]
I_K''	počáteční souměrný rázový zkratový proud	[A]
I_K	ustálený zkratový proud	[A]
I_K''	počáteční souměrný rázový zkratový proud	[A]
I_{KI}''	počáteční souměrný rázový zkratový proud 1f zkratu	[A]
I_{KE2E}''	počáteční souměrný rázový zkratový proud 2f zemního zkratu	[A]
I_{L1}	proud první fáze	[A]
I_{L2}	proud druhou fází	[A]
I_{L3}	proud třetí fází	[A]
I_{ik}	vybavovací proud ochrany	[A]
K_T	korekční součinitel	[-]
U_S	sdržené napětí	[V]
$Z_{(1)}$	sousledná zkratová impedance	[Ω]
$Z_{(2)}$	zpětná zkratová impedance	[Ω]
$Z_{(3)}$	netočivá zkratová impedance	[Ω]
Z_K	zkratová impedance 3f střídavé soustavy	[Ω]
c	napěťový součinitel	[-]

c_{max}	napěťový součinitel pro výpočet maximálních hodnot zkratového proudu	[-]
$i_{d.c.}$	nárazový zkratový proud	[A]
i_p	stejnoseměrná složka zkratového proudu	[A]
t_f	převod transformátoru	[-]
t_k	vybavovací čas ochrany	[s]

Obsah

Úvod.....	10
1 Elektrický oblouk	11
1.1 Vznik elektrického oblouku	11
1.2 Druhy ionizací.....	13
1.3 Části elektrického oblouku.....	14
1.4 Vlastnosti a druhy elektrického oblouku	15
2 Působení elektrického oblouku na lidský organismus	17
2.1 Tepelné účinky	17
2.2 Zvukové vlny a záblesky	19
2.3 Tlaková vlna.....	20
3 Analýza rizika při vzniku elektrického oblouku	22
3.1 Historie vzniku analýzy.....	22
3.2 Analýza rizika dle IEEE 1584 - 2002	23
3.2.1 <i>Postup analýzy</i>	24
3.3 Výstup analýzy.....	31
4 Určení zkratového proudu pro analýzu rizik při vzniku elektrického oblouku ...	36
4.1 Teorie zkratů	36
4.1.1 <i>Druhy zkratů</i>	36
4.1.2 <i>Průběh zkratového proudu</i>	38
4.2 Výpočet maximálního zkratového proudu.....	40
4.2.1 <i>Metody výpočtu</i>	41
4.2.2 <i>Podmínky výpočtu maximálního zkratového proudu</i>	44
4.2.3 <i>Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{K''}$</i>	45
5 Stanovení doby vypnutí poruchy pro účely analýzy rizik.....	47
5.1 Používané charakteristiky nadproudových ochran.....	47
5.1.1 <i>Časově závislá charakteristika</i>	47
5.1.2 <i>Časově nezávislá charakteristika</i>	48
5.2 Typy ochran.....	49
5.2.1 <i>Třífázová nadproudová ochrana (50,51)</i>	49
5.2.2 <i>Zemní proudová ochrana (50, 51G/N)</i>	51

6	Provedení analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku na konkrétní prvky průmyslové sítě	53
6.1	Software pro výpočet.....	53
6.2	Praktický výpočet	56
6.2.1	<i>Hladina 66 kV</i>	57
6.2.2	<i>Hladina 11 kV</i>	59
6.2.3	<i>Hladina 0,415 kV</i>	62
6.3	Sumarizace a porovnání s výsledky z PowerFactory	65
6.3.1	<i>Výsledné štítky</i>	66
Závěr	68
Použitá literatura	70
Seznam obrázků	71
Seznam tabulek	72

Úvod

V lidském podvědomí je poměrně dobře zakořeněn fakt, že elektrická energie může být pro živé bytosti smrtelně nebezpečná. Pověštinou je tento fakt spojován s přímým průchodem elektrického proudu tělem. Tato práce si klade za cíl představit i jiné riziko než přímý průchod proudu tělem. Jedná se o nebezpečí, které vzniká při existenci elektrického oblouku.

Jak dobře víme bezpečnost práce je v dnešní době alfou a omegou, která je skloňována ve všech činnostech, a které je věnována stále větší pozornost. Jako jedno z mála odvětví není bezpečnost na pracovištích ovlivněna, ze všech stran stále skloňovanou krizí a potřebou zefektivňovat a šetřit. Neustálé zpříšňování bezpečnostních norem, testování a zlepšování bezpečnostních mechanismů, vedlo k tomu, že se do zájmu normotvůrců dostal, pro své vlastnosti, elektrický oblouk. Vznikla tak analýza rizika při vzniku elektrického oblouku.

Abychom věděli, jak se před elektrickým obloukem co nejúčinněji chránit, je nutné nejprve jej prostudovat. Proto se první část práce zabývá vlastnostmi elektrického oblouku a jeho popisem. Následující kapitola rozebírá nebezpečí úrazu, které hrozí při jeho kontaktu s živou bytostí.

Stěžejní část pak rozebírá postup stanovení souboru ochranných opatření dle amerických norem IEEE 1584 – 2002 a NFPA70E. V rámci této části se čtenář seznámí s metodologií, jak určit charakteristické vlastnosti elektrického oblouku, který může vzniknout v zařízeních o rozdílných mechanických a elektrických parametrech.

Tento postup závisí na dvou hlavních faktorech, jimiž jsou největší možná hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu a čas, po který daná porucha (elektrický oblouk) trvá. Tyto dva údaje, které jsou stěžejní při tvorbě analýzy, jsou rozebrány ve dvou samostatných kapitolách.

Jako praktická část práce je na závěr zpracována analýza rizika při vzniku elektrického oblouku na vybrané prvky existující sítě napájející černouhelný hlubinný důl. Výsledky jsou prezentovány ve stejné formě jako na reálných zařízeních, tedy v podobě výstražných štítků.

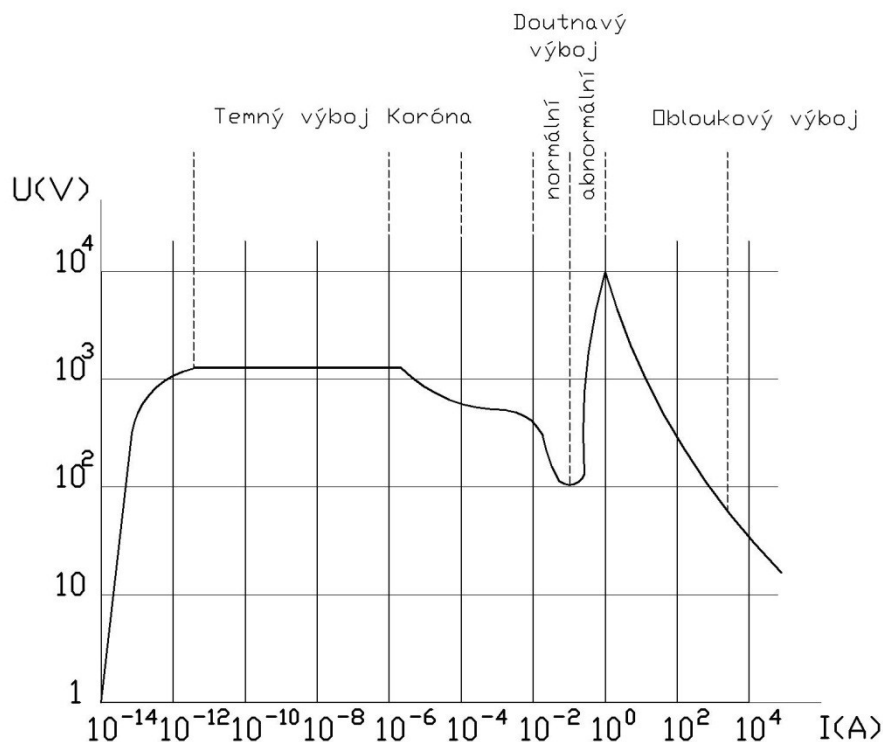
1 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk byl objeven v roce 1812 britským vědcem Humpry Davym. Jedná se o jev, který v elektrotechnice řadíme mezi samostatné elektrické výboje v plynech, hořících mezi elektrodami. Vzniká za normálního nebo zvýšeného tlaku. Elektrický oblouk má válcovitý tvar a je soustředěn do tenkého sloupce tvořeného ionizovaným plynem (plazmatem). Elektrický oblouk se postupem času stal běžnou součástí různých oborů elektrotechniky. Nejčastěji se s ním můžeme setkat v osvětlovací technice (obloukové lampy) nebo v elektrotepelné technice (obloukové pece, elektrické svařování). V těchto odvětvích je elektrický oblouk využíván pro své vlastnosti, zejména pro jeho záření resp. vývin tepla. V jiných odvětvích je naopak výskyt elektrického oblouku nežádoucí jako např. v přístrojové technice, kde způsobuje opalování kontaktů spínačů a tím zkracuje jejich životnost. Nežádoucí je rovněž, pokud elektrický oblouk vznikne následkem zkratu, ať už na vedení nebo v rozvodnách. Zde už hrozí velké materiální škody a může být ohroženo zdraví lidí zvířat.[1, 2]

1.1 Vznik elektrického oblouku

V následující kapitole jsou uvedeny fyzikální pochody vedoucí ke vzniku elektrického oblouku.

Jak už bylo uvedeno v předchozím textu, elektrický oblouk je výboj schopný samostatné existence. V přehledovém grafu (obr. č. 1) se nachází za doutnavým výbojem.



Obr. 1 Přehled elektrických výbojů

Obecně je pro vznik jakéhokoli výboje v plynném dielektriku nutné do plynu přivést elektricky nabitě částice, nebo je v něm vytvořit. Tomuto jevu říkáme ionizace plynného prostředí. Pokud dojde k ionizaci nacházejí se mezi elektrodami, kde má oblouk hořet, elektricky nabitě částice – elektrony a ionty. Přestože je vodivost ve sloupci elektrického oblouku zprostředkována převážně elektrony, nazýváme ji iontovou. Pro vznik obloukového výboje je dále nutné, aby na elektrodách bylo přítomno napětí. [1]

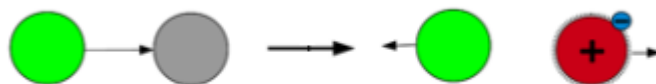
Plynné prostředí (vzduch) uvažované mezi elektrodami je souborem molekul, které se pohybují všemi směry, různými rychlostmi.

Při chaotickém pohybu a rychlostech 0 až 10^3 m/s do sebe molekuly narážejí. Při těchto nárazech rozeznáváme 2 druhy srážek – pružné a nepružné. Při pružné srážce se mění rychlosti a směry částic. Naopak při nepružných srážkách se pohybová energie molekul mění na jiný druh energie a tyto se pak mohou rozpadat na atomy resp. radikály. Hovoříme tedy, že dochází k disociaci molekul. Tyto dva druhy částic ovšem nevydrží osamocně existovat dlouhou dobu a spojují se opět v molekuly. Pokud však před opětovným spojením radikálu a atomu dojde ke srážce atomu s jinou částicí mohou nastat opět dva případy:

- srážka je pružná => částice si pouze vymění pohybové energie

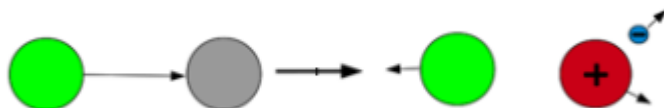
- srážka je nepružná \Rightarrow část energie se změní na energii budící nebo ionizační

Při vzniku *Budící energie* se přesune okrajový elektron do nestabilní dráhy a v důsledku se projeví jako uvolněná potenciální energie ve formě vyzářeného fotonu. Potenciální energie předcházející tomuto fotonu je vytvořena přesunutím okrajového elektronu zpátky do stabilní dráhy.



Obr. 2 Vznik budící energie

Při vzniku *ionizační energie* se z obalu atomu oddělí jeden elektron, tím vznikne z neutrálního atomu kladný a záporný iont. Pokud nedojde k rekombinaci tj. oba ionty se opět nespojí s jinými v neutrální částici, jsou dále urychlovány elektrickým polem, přičemž elektron rychle získá energii, která je dostatečná pro nabuzení popř. ionizaci. Tento děj se neustále opakuje, a pokud je splněna podmínka, že ionizační pochody jsou v rovnováze s rekombinačními pochody, vzniká plyn, který je schopen vést elektrický proud. Takovýto plyn nazýváme plazma elektrického výboje. [1]



Obr. 3 Vznik ionizační energie

1.2 Druhy ionizací

Rozeznáváme několik typů ionizací, které se vyskytují v souvislosti s elektrickým obloukem nebo vedou k jeho vzniku.

Fotoionizace – tento typ ionizace se v praxi vyskytuje hlavně v jádře elektrického oblouku. Nastává při pohlcení fotonů neutrální molekulou. Je hlavně vyvoláváno ultrafialovým, rentgenovým nebo gamma zářením.

Ionizace elementárních částic – tento typ ionizace je nejčastější u obloukových výbojů a mechanika jeho vzniku je popsána v předchozí kapitole, ze které vyplývá, že ke vzniku elektrického oblouku vedou nepružné srážky částic.

Termická ionizace plynů – tento typ ionizace hraje důležitou roli především při vzniku plazmatického stavu. Nastává při vysokých teplotách (2000 – 3000 K), kdy dochází k vytrhávání elektronů z obalů atomů. Vzniká ionizovaný atom a elektron, které pak tvoří volné nosiče náboje.

Z výše uvedeného textu tedy vyplývá, že obloukový výboj vzniká v plynném prostředí, které se stává díky ionizaci vodičem elektrického proudu. Tento výboj je nadále schopen samostatné existence, pokud vnější zásah nepřeruší mechanismus jeho hoření. V přístrojové technice se ve vypínačích a jističích používají zhášecí komory. Pokud oblouk vznikne následkem zkratu, ať už na vedení nebo v rozvodných zařízeních, je jeho přerušení závislé na působení předřazených ochranných tzn. automatické odpojení od zdroje napětí. [1, 2]

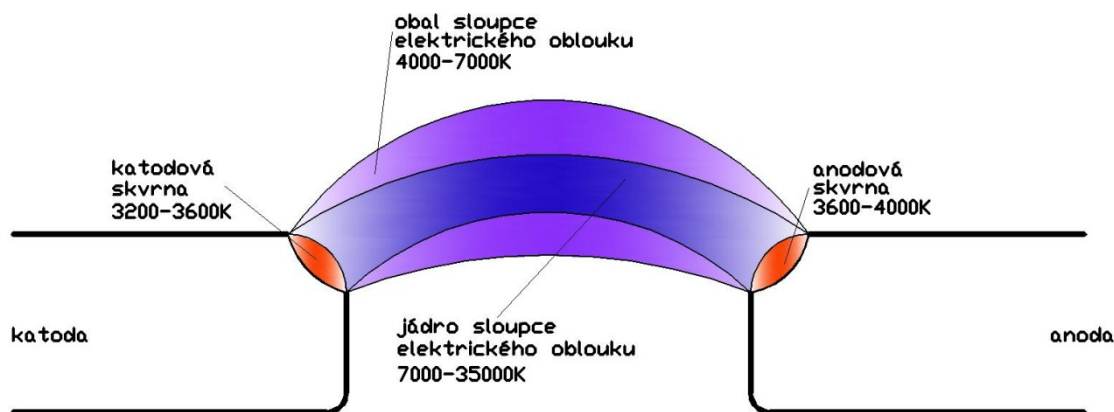
1.3 Části elektrického oblouku

Obloukový výboj se skládá ze tří částí a to z katodové oblasti, anodové oblasti a samotného sloupce elektrického oblouku.

Katodovou částí rozumíme katodu, která termickou emisí uvolňuje elektrony potřebné k ionizaci plynného prostředí a následnému zapálení elektrického oblouku. V oblasti katodového úbytku napětí získávají elektrony velkou kinetickou energii a při srážkách ionizují neutrální atomy na kladné ionty. Tyto kladné ionty dopadají zpátky na katodu, kterou zahřívají a tím udržují termickou emisí. Teplota katodové skvrny se pohybuje zhruba mezi 3200 až 3600K.

Anoda odvádí záporné částice na ni dopadající a zajišťuje jejich neutralizaci. Tím prakticky umožňuje přechod proudu mezi sloupcem oblouku tvořeným horkým plazmatem a mezi elektrickým obvodem, ve kterém oblouk hoří. Anoda, která je doslova bombardována dopadajícími elektrony se silně zahřívá a uvolňuje do sloupce oblouku atomy, které jsou zde ionizovány. Teplota anodových skvrn bývá větší než teplota skvrn katodových, pohybuje se mezi 3600 až 4000K.

Sloupec elektrického oblouku je tvořen disociovaným a ionizovaným plynem a při pohledu pouhým okem se jeví jako silně zářící, ostře ohraničený plynný útvar. Jeho záření je způsobeno plazmatem oblouku. Sloupec je tvořen jádrem a obalem. V jádru dosahuje sloupec elektrického oblouku vysokých teplot, až 35000K. Teplota obalu dosahuje hodnot mezi 4000 až 7000K. [1, 2]



Obr. 4 Rozložení teplot na elektrickém oblouku

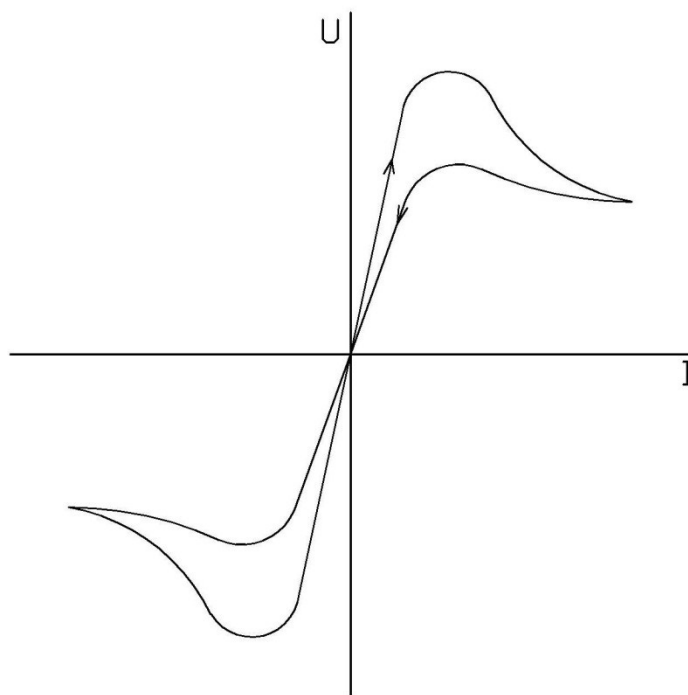
1.4 Vlastnosti a druhy elektrického oblouku

Charakteristické vlastnosti elektrického oblouku jsou především:

- vysoká teplota katodové skvrny
- velká proudová hustota katodové skvrny, řádově 10^3 A/cm^2
- malý katodový úbytek, menší než 50V
- Poměrně nízké napětí mezi elektrodami
- velký proud protékající výbojovou dráhou, až 10^3 A
- vysoká teplota sloupce oblouku a intenzivní záření

Elektrický oblouk můžeme dělit podle mnoha hledisek, ať už podle prostředí, ve kterém oblouk hoří, dle materiálu elektrod nebo podle složení výbojové dráhy. Nejčastěji však oblouk dělíme dle napájecího proudu na střídavý a stejnosměrný. Pro účely této diplomové práce budeme uvažovat elektrický oblouk napájený výhradně střídavým proudem.

Střídavý elektrický oblouk popisuje dynamická charakteristika. Jedná se o závislost obloukového napětí na proudu procházejícím výbojem.



Obr. 5 Dynamická charakteristika elektrického oblouku

Charakteristickou vlastností střídavého oblouku je, že uhasíná při každém průchodu proudu nulou a bezprostředně poté je opět zapalován s opačnou polaritou elektrod. Znovu zapálení je umožněno díky tepelné setrvačnosti elektrod, kdy katoda, která je zahřátá z předešlé půlperrody, emituje elektrony ihned na začátku nové půlperrody. [1,2]

2 Působení elektrického oblouku na lidský organismus

Velice dobře je v povědoví laické veřejnosti zakořeněn fakt, že úraz elektrickým proudem může být v některých případech smrtelný. Riziko úrazu, které vzniká od působení elektrického oblouku je jiného druhu. Zde není nutný fyzický kontakt osoby se živými částmi zařízení.

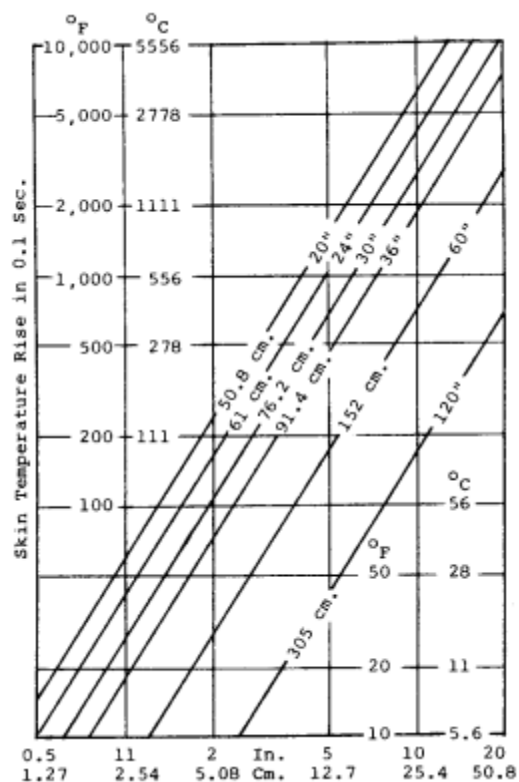
Z předchozí kapitoly, která nás seznamuje se základními vlastnostmi elektrického oblouku je zřejmé, že zejména díky jeho vysokým teplotám, bude osoba, která se ocitne v těsné blízkosti jeho hoření vystavena zdraví ohrožující situaci. Vedle tepelných se mohou objevit také účinky jako tlaková vlna, intenzita hluku, záblesky atd.

2.1 Tepelné účinky

Vedle laseru je elektrický oblouk hořící mezi kovovými elektrodami nejteplejší objekt, který se může na naší planetě vyskytovat. Teplota jeho sloupce může dosahovat teploty až 4x vyšší než je teplota na povrchu slunce.

Člověk je schopen své existence v poměrně velmi malém rozmezí teplot. Teplota lidské krve je 36,5 °C. Teplotu lidské kůže můžeme odhadnout na asi 34 °C. Pokud je teplota už jen o něco málo vyšší (desítky °C), může v průběhu několika hodin nastat kolaps životních funkcí. Teplota nad 70 °C znamená už pro buněčnou stavbu pokožky velké nebezpečí. Při této teplotě se mohou buňky nenávratně zničit během několika sekund.

Z výše uvedeného popisu je patrné, že elektrický oblouk, může mít pro lidský organismus z hlediska tepelných účinků fatální následky.[3]



Obr. 6 Teplota kůže vystavená oblouku na 0,1 s pro různé vzdálenosti [3]

Graf na obrázku 6 nám říká, jakou teplotu může pokožka osoby, která bude vystavena hořícímu elektrickému oblouku po dobu 0,1 s, dosáhnout v závislosti na průměru sloupce oblouku a na vzdálenosti mezi osobou a obloukem.

V závislosti na vzdálenosti osoby od oblouku a na energii, kterou hořící oblouk uvolní, můžeme popáleniny dělit na vyléčitelné a nevyléčitelné. U vyléčitelných je působící teplota do 46 °C, u nevyléčitelných je hranice pouze 62 °C. [3]

Tabulka 1 nám udává bezpečné vzdálenosti podle vzniku vyléčitelných a nevyléčitelných popálenin v závislosti na obloukové energii.

Tabulka 1 Vztah vzdálenosti a energie oblouku [3]

Vzdálenost (cm)	Energie oblouku (MW)	
	Vyléčitelné	Nevyléčitelné
50	5,2	7
61	7,5	10
76,2	11,8	16
81,4	17	23
152,4	47	64
304,8	189	256

[3]

2.2 Zvukové vlny a záblesky

Zvukový projev je zejména při startu hoření elektrického oblouku výrazný. Při zapálení dochází k výraznému akustickému „prásknutí“. Toto je způsobeno rychlým zahřátím plynného prostředí, ve kterém oblouk hoří a jeho následným rozepnutím. Mechanismus vzniku zvukové vlny je stejný jako u hromu, který je projevem bleskového výboje.

Tabulka 2 Přípustné dávky hluku [4]

Ekvivalentní hladina akustického tlaku A [dB]	Limit pro expozici nechráněného sluchu		
	Hodiny	Minuty	Vteřiny
85	8		
88	4		
91	2		
94	1		
97	-	30	
100	-	15	
103	-	7	30
106	-	3	45
109	-	1	53
↓	↓	↓	↓
130 - 140	-	-	<1

V tabulce 2 jsou uvedeny limitní časy pro vystavení lidského ucha dané intenzitě hluku. Pro lidský sluch představuje největší nebezpečí právě impulzní hluk. Lidský sluch není schopen se těmito zvuky přizpůsobit a jsou pro člověka velmi bolestivé.

Negativní účinek zvukového projevu spočívá v jeho neočekávatelnosti a jeho vysoké intenzitě. Pracovník může být zvukovou vlnou paralyzován, může ztratit orientaci a v krajním případě může dojít k okamžitému těžkému a trvalému poškození sluchu. Zvukový projev doprovázející elektrický oblouk může dosáhnout až hodnoty okolo 160 dB. [4]

Ionizovaný sloupec elektrického oblouku vyzařuje záření velice silně v ultrafialové (UV) oblasti.



Obr. 7 Hoření malého elektrického oblouku [5]

UV záření je elektromagnetické vlnění, které má vlnovou délku kratší než viditelné světlo, ale delší než rentgenové záření.

Negativní účinek ostrého záření elektrického oblouku na pracovníka, spočívá především v náhlém osvětlení a krátkodobé ztrátě zraku (přechodná slepota). Není možné sledovat elektrický oblouk bez ochranných pomůcek (vhodnou ochrannou při této činnosti je svářečské sklo). Z toho vyplývá jako negativní účinek při pohledu na sloupec elektrického oblouku dezorientace. Při dlouhodobé expozici tohoto záření může dojít k poškození zraku (spojivek).

2.3 Tlaková vlna

Následkem vysoké teploty elektrického oblouku je kromě zvukového projevu také tlaková vlna.

Tabulka 3 Vyjádření následků tlakové vlny [6]

Přetlak v čele tlakové vlny [kPa]	Dopady na člověka
16,5	Poškození ušních bubíneků 1%
19,3	Poškození ušních bubíneků 10%
34,5	Poškození ušních bubíneků 50%
43,5	Poškození plic
100	Úmrtí 1%
121	Úmrtí 10%
141	Úmrtí 50%
176	Úmrtí 90%
200	Úmrtí 100%

Tabulka 3 nám udává vliv přetlaku tlakové vlny na člověka. Dle NFPA70E může u velkých obloukových výbojů dosahovat desítky i stovky kPa. Z toho je patrné, že u tlakové vlny způsobené elektrickým obloukem hrozí nebezpečí prasknutí ušních bubínků, poškození plic a ve výjimečně silných tlakových vlnách i úmrtí.

Tlaková vlna je dále spojena s možností rozstříku utaveného materiálu (šrapnelu – např. kousky přípojníc), který může zasáhnout a zranit pracovníka. Rychlosti těchto šrapnelů mohou dosahovat i více než 1600 km/h. Jedná se tedy o rychlost, která je srovnatelná s ústřovou rychlostí kulky.[6, 7]

Na závěr této kapitoly je nutno podotknout, že většina vážných zranění pocházejících od elektrického oblouku je způsobena jeho vysokou teplotou. Ostatní projevy obloukového výboje a jejich vliv na člověka můžeme v praxi považovat spíše za sekundární. Nicméně je potřeba chránit pracovníky, kteří mohou být vystaveni působení elektrického oblouku před všemi těmito faktory.

3 Analýza rizika při vzniku elektrického oblouku

Problematika analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku je dnes v České republice prakticky neznámá. V zahraničí je běžnou praxí, že k nově vznikajícím projektům je tato analýza automaticky připojena a jsou v ní provedeny potřebné výpočty s konkrétním závěrem. V podstatě je celý výstup z analýzy shrnut do bezpečné vzdálenosti, která v případě nehody ochrání osoby, které se v blízkosti vyskytují nebo pracují na blízkém zařízení a do energie uvolněné při zapálení a hoření elektrického oblouku po dobu, která je potřebná pro zareagování ochran. Dále pak z analýzy vycházejí potřebné OOPP (ochranné osobní pracovní prostředky, v en PPE – personal protective equipment), které jsou všichni pracovníci, kteří pracují v prostorech s nebezpečím vzniku elektrického oblouku, povinni používat. Konkrétní výstupy jsou pak uvedeny na štítku umístěném na příslušném rozvodném zařízení. Jednou větou tedy můžeme analýzu rizika při vzniku elektrického oblouku popsat jako metodu, která určuje rizika možných zranění vzniklá v důsledku energie hoření elektrického oblouku. [8]

3.1 Historie vzniku analýzy

Prvopočátky myšlenky nebezpečí, které může vzniknout při vzniku elektrického oblouku lze vysledovat k Ralphu Lee. Lee ve svém článku s názvem *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* (Jiná elektrická nebezpečí: Popáleniny od elektrického oblouku) z roku 1982 uvádí, že elektrický oblouk resp. jeho vnější projevy tvoří podstatnou část úrazů při nehodách, které jsou způsobeny selháním elektrického zařízení.

V tomto článku Lee rozebíral vliv extrémě vysokých teplot a drobné kapičky roztaveného materiálu, které vyletují vlivem hoření oblouku. Tyto skutečnosti vedly k tomu, že začal vznikat zcela nový pohled na nebezpečí, které skýtá elektrický proud, potažmo elektřina obecně a do zažitého schématu „typického“ úrazu elektrickým proudem, který jsme do té doby vnímali jako průchod proudu lidským tělem, se začal začleňovat vliv nebezpečí od volně hořícího oblouku.

Poté co se forézní zkoumání nehod způsobených elektřinou soustředilo na nebezpečí, které představuje volné hoření elektrického oblouku, Lee formuloval vztah mezi vzdáleností a energií, který definoval největší tepelný efekt od elektrického oblouků v místě otevřených dveří nebo sundaných krytů z rozvaděčových skříní, ve kterých hoří elektrický oblouk.

Vznikl tak nový obor, na který navazovali další a další vědci. Jednou z nejznámějších publikací v tomto nově vzniklém oboru je publikace od kolektivu Doughty, Neal a

Floyd *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems* (Předpovídání poruchové energie pro lepší řízení nebezpečí od elektrického oblouku ve 600V distribučních sítích). Tato publikace uvádí výsledky z mnoha simulací, které zkoumají jak hoření oblouku v otevřeném, tak i v uzavřeném prostoru. Simulace byly provedeny na 3f síti 600 V a jsou použitelné pro rozsah poruchového zkratového proudu 16 – 50 kA. Bylo zjištěno, že teplo odrážené od okolního povrchu do okolí se zesiluje směrem k otevřeným krytům, což je logické, protože teplo se jako energie šíří z teplejšího místa do míst s nižší teplotou.

Po oficiálním uznání a přijetí nebezpečí, které vzniká od teploty elektrického oblouku se dostala do popředí otázka ochrany zaměstnanců od všech rizik, které představuje vznik elektrického oblouku z poruchového stavu. Omezení, které se vyskytovaly do té doby při určení tohoto rizika, byly překonány.

V dnešní době se analýzu rizika při vzniku elektrického oblouku používá norma IEEE1584 – 2002, která staví na empiricky odvozených modelech, které jsou založené na statistických analýzách a dostupných vybavovacích křivkách testovaných zařízení. Modely v této normě umožňují rychlé a komplexní řešení pro elektrické oblouky v jedno nebo třífázových elektrických systémech, které jsou buď v otevřeném prostoru nebo uzavřeny v rozváděči. Modely jsou použitelné bez ohledu na jmenovité napětí vyšetřované soustavy. [7, 8]

3.2 Analýza rizika dle IEEE 1584 - 2002

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, řeší samotnou analýzu tj. stanovení potřebných dat norma IEEE 1584 – 2002.

V této normě jsou uvedeny vedle empiricky odvozených skutečností, které řeší napěťové soustavy od 208 V do 15 kV, také teoreticky odvozené modely aplikovatelné pro libovolné napětí. Součástí normy jsou rovněž programy s vloženými rovnicemi, které mohou být použity k určení energie generující poruchový elektrický oblouk a k určení bezpečné hranice, která ochrání případné přítomné osoby.

Je namístě zde zmínit, že norma pracuje s některými specifickými definicemi, které ne vždy mají v odborné české technické literatuře obdobu. Proto zde uvádím stručný seznam pojmů, tak jak je definuje IEEE 1584 – 2002, a které jsou nutné ke správné orientaci v dané problematice a úplnému pochopení řešení. Pojmy jsou zde uvedeny v anglickém jazyce, přičemž v závorce je vždy uveden překlad do češtiny dle autora.

Arc – flash hazard (riziko od elektrického oblouku): Nebezpečný stav spojený s uvolněním energie, způsobené elektrickým obloukem.

Arcing fault current (poruchový proud oblouku): Proud protékající elektrickým obloukem v důsledku poruchy

Available fault current (dostupný poruchový proud): Proud, který se může vyskytnout vzhledem k instalovanému zařízení vyrábějící el. en. a velkým motorům a vzhledem k impedanci vodivé cesty

Bolted fault current (poruchový proud): Zkrat nebo elektrický kontakt mezi dvěma vodiči s rozdílnými potenciály, jehož impedance nebo odpor je prakticky rovný 0

Circuit (Obvod): Vodič nebo systém vodičů, jimiž protéká elektrický proud

Electrical hazard (Nebezpečí úrazu elektrickým proudem): Nebezpečný stav, ve kterém může vést úmyslný nebo neúmyslný kontakt nebo porucha zařízení k šoku, popáleninám od elektrického oblouku, tepelným popáleninám nebo výbuchu

Electrical shock (Úraz elektrickým proudem): Fyzikální stav, který nastává při průchodu proudu tělem

Electrical utilization equipment (Zařízení využívající elektrickou energii): Zařízení, které využívá elektrickou energii pro elektrické, elektromechanické, chemické, tepelné, světelné nebo podobné účely

Energized (Pod napětím): Elektricky připojeno nebo mající vlastní zdroj napětí

Exposed – live – parts (Exponované – živé – části): Živá část zařízení, která není vhodně chráněna izolací, přístupná na dotyk

Fault current (Poruchový proud): Proud, který teče z jednoho vodiče do druhého nebo do země v důsledku abnormálního spojení (včetně oblouku)

Flash hazard analysis (Analýza rizika elektrického oblouku): Metoda pro stanovení rizika zranění v důsledku vystavení se energii z elektrického oblouku

Flash – protection boundary (Ochranná hranice před obloukem): Omezení přístupu k živým částem, které jsou neizolované nebo vystavené a kde se může osoba popálit popáleninami druhého stupně

Incident energy (Dopadající energie): Množství energie na povrchu v určité vzdálenosti od zdroje, vznikající v důsledku elektrického oblouku. Udává se v J/cm^2 .

Shock hazard (Nebezpečí úrazu elektrickým proudem): Nebezpečný stav spojený s možným vydáním energie způsobeným kontaktem s živými částmi

Voltage – nominal (Napětí – jmenovité): Jmenovitá hodnota napětí, která definuje jeho napěťovou třídu (120/240 V, 480Y / 277 V, 600 V). Skutečné napětí v obvodech se může lišit v mezích, které zaručují spolehlivou funkci zařízení

Working distance (Pracovní vzdálenost): Vzdálenost mezi možným bodem elektrického oblouku a hlavy osoby, která vykonává na místě pracovní úkon [8]

3.2.1 Postup analýzy

Analýza rizika při vzniku elektrického oblouku by měla být prováděna v souvislosti nebo jako pokračování zkratové studie a nastavení ochran. Ze zkratové studie se následně určí maximální hodnota nárazového zkratového proudu, souměrný zkratový

vypínací proud a zkratová odolnost instalovaných zařízení. V nastavení ochran určíme čas potřebný pro ochranu zařízení před přetížením nebo zkratem. Výsledky z těchto studií pak dohromady poskytují informace nutné k provedení analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku. Celkový výstup z této analýzy je pak reprezentován hranicemi pracovních vzdáleností a dopadající energií vyskytující se uvnitř těchto ohraničených oblastí. Tyto výsledky platí bez ohledu na charakter zařízení, ať už se jedná o výrobu, distribuci nebo technologii.

Rozsah použití empiricky jistěného modelu tak, jak jej uvádí IEEE1584 – 2002 je použitelný pro systémy, ve kterých platí následující parametry:

- Napětí v rozmezí 208 – 15000 V, třífázová soustava
 - Frekvence sítě 50 nebo 60 Hz
 - Nárazový zkratový proud 700 – 106000 A
 - Platí pro všechny typy sítí (TN, IT, TT)
 - Mezery mezi vodivými částmi 13 – 152 mm
 - Poruchy zahrnující třífázové zkraty
- [8]

3.2.1.1 Zjištění parametrů sítě

Velkou částí z celkového postupu pro zjištění analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku je získávání dat. Norma IEEE1584 – 2002 doporučuje, aby získávání dat prováděla osoba znalá poměrů v místní síti. Nejlepší varianta ovšem je, když projekt vzniká tzv. na zelené louce a patřičné údaje jsou ve většině známé z projektu. Je tedy nutné znát jednopólové schémata sítě, časové průběhy proudů a zkratové poměry v síti. Rovněž se musí zahrnout nízkonapěťové sítě a velké odbočky. Pro analýzu zkratových poměrů je potřeba znát všechny napájecí zdroje, veškeré technické vybavení, rezervní a pracovní elektrocentrály a velké elektromotory, které mohou přispívat do zkratu (typicky 37 kW a vyšší).

Dále je potřeba znát všechny transformátory v síti, distribuční obvody, systém uzemnění (typ sítě), tlumivky omezující proud, kondenzátory stabilizující napětí, vypínače, parametry ochran atd. Pro všechny tyto zařízení je potřeba znát jejich jmenovité hodnoty (napětí, proud, výkon, kapacitu, reaktanci atd.).

Pro zjištění impedance je nutné znát parametry kabeláže. Tyto parametry bývají uvedeny v tabulkách výrobců nebo je lze nalézt v národních technických předpisech, kde jsou uvedeny ve formě tabulek.

Z výše uvedeného textu vidíme, že vstupních dat je skutečně hodně. Prakticky se jedná o celkový popis sítě a technologie v místě instalace. Všechny tyto data a parametry musí být aktuální. [8]

3.2.1.2 Provozní režimy sítě

V tomto bodě je potřebné určit provozní stavy sítě. Zde může nastat mnoho případů přes jednoduché sítě až po sítě, ve kterých může nastat mnoho provozních režimů.

Typickými příklady jsou:

- Jedna nebo více funkčních přípojek v provozu
- Rozvodna s jedním nebo dvěma primárními přívody
- Rozvodna se dvěma transformátory se záložním přívodem
- Generátory běžící paralelně k síti (napájecí, záložní)

Zde je důležité určit možné zkratové proudy pro všechny režimy provozu, tedy minimální a maximální zkratové proudy. [8]

3.2.1.3 Určení maximálního zkratového proudu

Maximální zkratový proud je nutné určit ve všech místech podniku. Jinými slovy ve všech prostorech, kde by mohli pracovníci provádět servisní činnost. Tato analýza se provede pro každý bod na přípojnících. Ne u všech přípojníc je nutné počítat se všemi provozními stavy, protože je možný provozní stav, který nebude významně přispívat do zkratu na dané přípojnici.

3.2.1.4 Určení proudu obloukem

Tento proud závisí primárně na maximální hodnotě zkratového proudu. Maximální zkratový proud v ochranném zařízení můžeme zjistit pomocí zkratové analýzy. Zahrnuje příspěvky běžných a alternativních přípojek a připojených motorů.

Proud obloukem můžeme určit výpočtem. Tento proud bude menší než maximální hodnota zkratového proudu. Svou roli zde hraje impedance samotného sloupce oblouku, zejména u nízkonapěťových rozvodů (do 1000 V). U vyšších napěťových hladin bude proud obloukem také menší, ne však tolik jako u nn sítí.

IEEE1584 – 2002 uvádí pro zjištění tohoto proudu vztah:

Pro systémy nízkého napětí (do 1000 V).

$$I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V(\lg I_{bf}) - 0,00304 \cdot G(\lg I_{bf}) \quad (1)$$

Kde

I_a	proud obloukem
K	-0,153 pro otevřené systémy -0,097 pro uzavřené systémy
I_{bf}	souměrný rázový zkratový proud
V	jmenovité napětí sítě
G	mezera mezi vodiči (mm)

Pro systémy, které používají síť o jmenovitém napětím větším než 1000 V.

$$I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

Vysokonapěťové sítě nerozlišují mezi uzavřeným a otevřeným systémem.

Tyto vzorce platí pouze pro třífázové zkraty. [8]

3.2.1.5 Zjištění charakteristik příslušných ochranných zařízení a doby trvání elektrického oblouku

V tomto bodě zjišťujeme charakteristiky jističů a pojistek v místě instalace, kde předpokládáme možnost vzniku elektrického oblouku. Nejlehčí cesta je v tomto případě vyjít z charakteristik udávaných výrobcí ochran. Pro přesnější provedení je však vhodné tyto charakteristiky vytvořit v některém z dostupných softwarů.

U pojistek je potřeba rozlišovat mezi různými časy. Výrobce zde může uvádět čas potřebný pro tavení drátu uvnitř pojistky a čistý čas vypnutí. V takovém případě počítáme s čistým (reálným) časem. Pokud by výrobce pojistek uváděl pouze průměrné časy tavení je potřeba k této hodnotě připočíst 15% (do 0,03 s) resp. 10% (nad 0,03 s). [8]

3.2.1.6 Zjištění napěťových soustav a zatřídění zařízení

Pro každý přípojnicový systém resp. rozvodnu se určí jeho jmenovité napětí. Dále se v tomto kroku určí třída instalovaných zařízení ve smyslu tabulky 2.

Tabulka 4 Určení tříd zařízení [8]

Třída zařízení	Typická mezera mezi přípojnými (mm)
15 kV rozvodna	152
5 kV rozvodna	104
nn rozvodna	32
nn řízení pohonů a podružné rozváděče	25
vodiče	13
Ostatní	nevyžaduje se

Z tabulky 2 je patrné, že zařazení zařízení spočívá v určení vzduchových izolačních vzdáleností mezi jednotlivými přípojnými v rozvodných zařízeních, rozváděčích a mezi vodiči. Norma IEEE 1584 – 2002 udává standardní přehled pro běžná rozvodnicová zařízení.

3.2.1.7 Stanovení pracovních vzdáleností

Ochrana před nebezpečím úrazu, které představuje hoření elektrického oblouku je vždy závislá na množství energie, kterou může být zasažena osoba do oblasti hlavy a těla v pracovní vzdálenosti. Neuvažuje se množství energie, která může zasáhnout dlaně nebo celé paže. Stupeň zranění (popálení) v tomto případě závisí na rozsahu popálené kůže. Hlava a tělo představuje procentuálně velkou část z celkového povrchu kůže, která může být zasažena výbojem. Zranění v této oblasti jsou mnohem nebezpečnější z hlediska ohrožení života postižené osoby. Typické pracovní vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce 3. [8]

Tabulka 5 Určení pracovních vzdáleností [8]

Třída zařízení	Typická pracovní vzdálenost (mm)
15 kV rozvodna	910
5 kV rozvodna	910
nn rozvodna	610
nn řízení pohonů a podružné rozváděče	455
vodiče	455
Ostatní	dle místních podmínek

Typické pracovní vzdálenosti, jak je vidíme uvedené v tab. 2 jsou stanoveny jako součet vzdálenosti mezi pracovníkem stojícím před zařízením a vzdálenosti od zařízení k potenciálnímu nebezpečí výskytu elektrického oblouku uvnitř zařízení. [8]

3.2.1.8 Určení množství energie pro všechny druhy zařízení

Jedná se o určení velikosti energie, která může být vygenerována při poruše (zkrat => oblouk) v daném zařízení. Norma IEEE 1584 – 2002 uvádí vzorec, který platí pro časy hoření elektrického oblouku větší než 0,2 s a vzdálenosti mezi obloukem a osobou větší než 610 mm.

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 \cdot G \quad (3)$$

Kde

E_n	uvolněná energie (J/cm^2) stanovená pro čas a vzdálenost
K_1	-0,792 pro otevřené systémy -0,55 pro uzavřené systémy
K_2	0 pro neuzemněné sítě nebo sítě uzemněné přes velkou impedanci (TT, IT) -0,113 pro uzemněné sítě (TN)
G	mezera mezi vodiči

Po úpravě dostaneme

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (4)$$

Kde

E	uvolněná energie (J/cm^2)
C_f	1 pro sítě < 1 kV 1,5 pro sítě > 1 kV
E_n	normalizované hodnoty energie
t	čas hoření oblouku (s)
D	vzdálenost mezi obloukem a osobou (mm)
x	koeficient vzdálenosti

[8]

Tabulka 6 Typické vzdálenosti a koeficient vzdálenosti [8]

Jmenovité napětí sítě (kV)	Zařízení	Typická vzdálenost mezi vodiči (mm)	Koeficient vzdálenosti
0,208 – 1	Venkovní	10 – 40	2
	Rozvodny	32	1,479
	Podružné rozváděče, měniče	25	1,641
	Vodiče	13	2
>1 – 5	Venkovní	102	2
	Rozvodny	13 – 102	0,973
	Vodiče	13	2
< 5 - 15	Venkovní	13 – 153	2
	Rozvodny	153	0,937
	Vodiče	13	2

Výše uvedené vzorce jsou implementovány ve výpočetním software, jehož pomocí se dnes analýza rizika při vzniku elektrického oblouku počítá. [8]

3.2.1.9 Stanovení ochranného pásma

K určení ochranného pásma uvádí IEEE 1584 – 2002 empiricky odvozený vztah:

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (5)$$

Kde

D_B vzdálenost ochranného pásma od oblouku (mm)

C_f 1 pro síť < 1 kV

1,5 pro síť > 1kV

E_n normalizované hodnoty energie

E_B uvolněná energie (J/cm²) na hranici ochranného pásma


t čas (s)

x koeficient vzdálenosti

Vzorec počítá s tím, že bezpečná hranice je taková, ve které nemůže vzniknout taková uvolněná energie od elektrického oblouku, která by mohla osobě způsobit popáleniny druhého stupně. [8]

3.3 Výstup analýzy

Jak již bylo zmíněno výše samotný výstup z analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku je souhrn informací a opatření, který je umístěn na daném pracovišti ve formě štítku.

 WARNING	
ARC FLASH & SHOCK HAZARD APPROPRIATE PPE REQUIRED	
Arc Flash Hazard Protection Hazard Risk Category: Working Distance: mm mm Incident Energy: cal/cm ² cal/cm ² Arc Flash Boundary: mm mm	Protective equipment Hard hat Safety glasses or safety goggles Hearing protection Leather work shoes Arc Rated Clothing Arc-rated long-sleeve shirt and pants or coverall Arc-rated face shield or Arc-rated arc flash suit hood Arc-rated gloves Arc-rated jacket, parka, rainwear or hard hat liner Heavy leather duty gloves
Shock Protection Boundaries Limited Approach Boundary: 1000 mm Restricted Approach Boundary 300 mm Prohibited Approach Boundary: 25 mm	
Equipment Name: Nominal Voltage: kV kV	

Obr. 8 Příklad výstupu z analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku [9]

Toto řeší dokument NFPA70E z roku 2012. Jaké informace musí popisný štítek obsahovat si probereme dále.

(1) Jmenovité napětí soustavy

Jedná se o jmenovité napětí soustavy, která jsou běžná pro daný region a jsou převážně určena napájecí soustavou popř. instalovanou technologií.

(2) Hranice elektrického oblouku

Jedná se o vzdálenost od působení elektrického oblouku, ve kterém je pravděpodobné, že osoba, která se zde vyskytuje, bude zasažena energií způsobující popáleniny druhého stupně. Dle NFPA70E je energie pro způsobení popálenin druhého stupně stanovena na 1,2 cal/cm².

(3) Alespoň jeden údaj z následujících

a) Energie působící v místě výkonu činnosti

Jedná se o množství energie, která se vyskytne v takové vzdálenosti od potenciálního elektrického oblouku, ve které je prováděna pracovní činnost. Jak už bylo uvedeno dříve, tato energie se vyjadřuje v kaloriích na centimetr čtverečný.

b) Minimální stupeň ochrany pro pracovní oděv

Toto opatření vychází z kategorie nebezpečí (HRC – Hazard Risk Category) viz dále. Organizace provozující zařízení, na kterém je riziko vzniku elektrického oblouku musí vybavit zaměstnance ochranným oděvem, který odpovídá danému stupni rizika HRC.

c) Stupeň ochrany OOPP (PPE – Personal Protective Equipment)

Osobní ochranné pracovní prostředky závisí na energii uvolněné při vzniku oblouku, který hrozí v místě, kde je prováděna práce na elektrickém zařízení. Stanovení této energie se provádí výpočtem, viz výše. OOPP musí chránit veškeré části těla, které mohou být vystaveny působení elektrického oblouku. Tyto prostředky zahrnují boty, rukavice, teplotně odolné montérky, ochranné brýle aj. přičemž ochrana sluchu a kožené rukavice jsou povinné pro všechny HRC kategorie.

d) Kategorie nebezpečí (HRC – Hazard Risk Category)

Hlavní třídění je prováděno pomocí stupnice. Typické značení je pak od nuly do čtyř. Nula zde označuje minimální a čtyřka maximální nebezpečí vyplývající z charakteru zařízení. Po zatřídění do kategorie 0 – 4 následuje přiřazení jednotlivých OOPP.[7]


Tabulka 7 OOPP dle kategorie nebezpečí [7]

Tabulka 130.7(C)(16) Ochranný oděv a osobní ochranné pracovní pomůcky	
Kategorie nebezpečí	Ochranný oděv a OOPP
0	Ochranný oděv, netavící se nebo ošetřené přírodní vlákno (ošetřená bavlna, vlna, hedvábí, nebo směsi z těchto materiálů) s hustotou 150 g/m²
	Košile (dlouhý rukáv) Kalhoty (dlouhé)
	Ochranné pomůcky
	Brýle s bezpečnostním sklem

	<p>Ochrana sluchu (špunty)</p> <p>Kožené rukavice</p>
1	<p>Obloukově odolné oblečení, odolnost minimálně 4 cal/cm²</p> <p>Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet</p> <p>Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce</p> <p>Obloukově odolná bunda, nepromokavá</p> <p>Ochranné pomůcky</p> <p>Přilba</p> <p>Brýle s bezpečnostním sklem</p> <p>Ochrana sluchu (špunty)</p> <p>Kožené rukavice</p> <p>Kožené pracovní boty</p>
2	<p>Obloukově odolné oblečení, odolnost minimálně 8cal/cm²</p> <p>Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet</p> <p>Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce</p> <p>Obloukově odolná bunda, nepromokavá</p> <p>Ochranné pomůcky</p> <p>Přilba</p> <p>Brýle s bezpečnostním sklem</p> <p>Ochrana sluchu (špunty)</p> <p>Kožené rukavice</p> <p>Kožené pracovní boty</p>
3	<p>Obloukově odolné oblečení, zvolené dle povahy zařízení odolnost minimálně 25cal/cm²</p> <p>Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet</p> <p>Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce</p> <p>Obloukově odolná bunda, nepromokavá</p> <p>Ochranné pomůcky</p> <p>Přilba</p> <p>Brýle s bezpečnostním sklem</p> <p>Ochrana sluchu (špunty)</p> <p>Kožené rukavice</p>

	Kožené pracovní boty
4	<p>Obloukově odolné oblečení, zvolené dle povahy zařízení odolnost minimálně 40cal/cm²</p> <p>Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce Obloukově odolná bunda, nepromokavá</p> <p>Ochranné pomůcky</p> <p>Přilba Brýle s bezpečnostním sklem Ochrana sluchu (špunty) Kožené rukavice Kožené pracovní boty</p>
-1	<p>Žádné OOPP nejsou vhodné</p> <p>Zákaz prací při přítomnosti napětí, zákaz vstupu pracovníků</p>

Z výše uvedeného textu vidíme, že všechny body vedou k použití ochranných osobních pracovních prostředků. Kromě poslední skupiny kam je vstup pod napětím zakázán. Tuto kategorii reprezentuje obrázek číslo 9.

 DANGER	
ARC FLASH & SHOCK HAZARD !!! NO APPROPRIATE PPE !!!	
<p><u>Arc Flash Hazard Protection</u></p> <p>Hazard Risk Category: Working Distance: mm mm Incident Energy: cal/cm² cal/cm² Arc Flash Boundary: mm mm</p> <p><u>Shock Protection Boundaries</u></p> <p>De-Energize Elsewhere Before Access</p>	<p>Protective clothing and PPE</p> <p>!!!NO APPROPRIATE PPE!!!</p>
<p>Equipment Name: Nominal voltage: kV kV</p>	

Obr. 9 Ukázka štítku kategorie -1 [9]

Nepovinné je pak uvedení hranic pro přiblížení, které definují nebezpečí pro pracovníka. Hranice nám definují tři zóny:

Omezený přístup – do této zóny mohou vstoupit pouze kvalifikovaní pracovníci. Nekvalifikovaní pracovníci pouze s použitím příslušných OOPP v doprovodu kvalifikované osoby.

Vyhrazený přístup – do této zóny mohou vstoupit pouze kvalifikovaní pracovníci s platnou technickou dokumentací technologie a po učinění kroků zamezujících nebezpečným stavům.

Zakázaný přístup – do této zóny mohou vstoupit pouze kvalifikovaní pracovníci. Musí se učinit taková opatření jako by šlo o práci pod napětím.

Tyto zóny ovšem nesouvisejí s energií uvolněnou při vzniku elektrického oblouku. Vztahují se ke jmenovité hodnotě napětí a na štítku působí spíše jako doplňková informace. [7]

4 Určení zkratového proudu pro analýzu rizik při vzniku elektrického oblouku

Pro provedení analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku je jednou ze stěžejních částí určení zkratových poměrů v posuzované síti. Toto je nutné pro určení proudu obloukem.

4.1 Teorie zkratů

Zkrat je nahodilé nebo úmyslné spojení různých fází elektrického obvodu mezi sebou nebo spojení jedné nebo více fází se zemí, přičemž impedance tohoto spojení je velmi nízká, prakticky rovná nule.

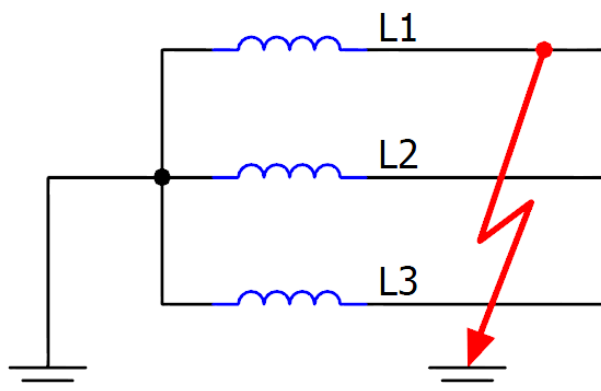
Zkratové proudy se určují jako funkce času v místě zkratu od jeho počátku až po konec zkratového děje. Velikosti zkratových proudů odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu.[10]

4.1.1 Druhy zkratů

Základní rozlišení zkratů provádíme podle počtu fází, které se na zkratu podílejí a zda je či není zkrat spojen se zemí.

4.1.1.1 Jednofázový zkrat

Zde se jedná o spojení jedné fáze se zemí. Vzniká u soustav s uzemněným uzlem (TN, TT) u soustavy izolované (IT) vzniká při spojení fáze a země zemní spojení.

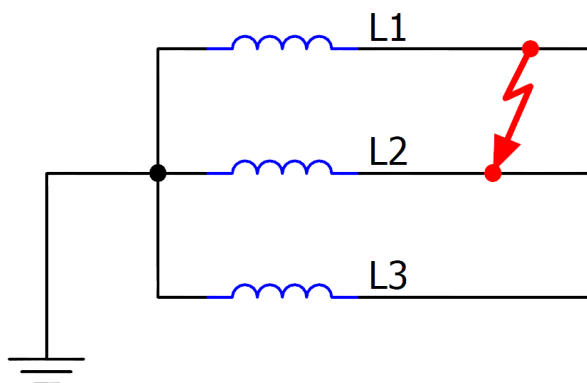


Obr. 10 Jednofázový zkrat

Velikost jednofázového zkratu je dána souslednou, zpětnou a nulovou složkou zkratové impedance. Při malé složce nulové impedance může být hodnota proudu větší než u zkratu trojfázového.[10]

4.1.1.2 Dvoufázový zkrat izolovaný

Vzniká vodivým spojením dvou různých fází. Může vzniknout ve všech typech sítí. Ze všech zde uvedených druhů zkratů má nejmenší hodnotu

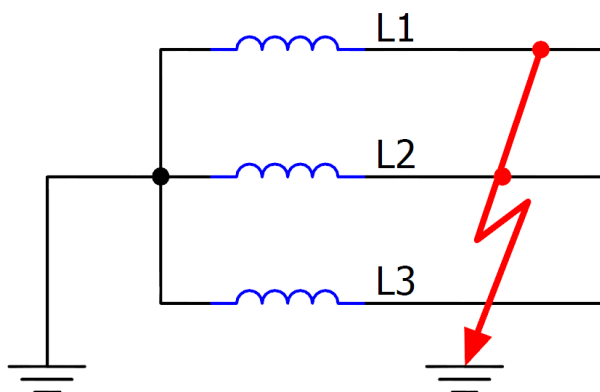


Obr. 11 Dvoufázový zkrat izolovaný

Jeho velikost je dána souslednou a zpětnou složkou zkratové impedance. [10]

4.1.1.3 Dvoufázový zemní zkrat

Vzniká spojením dvou různých fází a země. Většinou vzniká postupně z jednofázového nebo dvoufázového zkratu. Při výpočtech se většinou neuvažuje (zkrat je většinou vypnut ochranami dříve, než vznikne 2f zemní spojení). Vzniká u sítí s uzemněným uzlem.



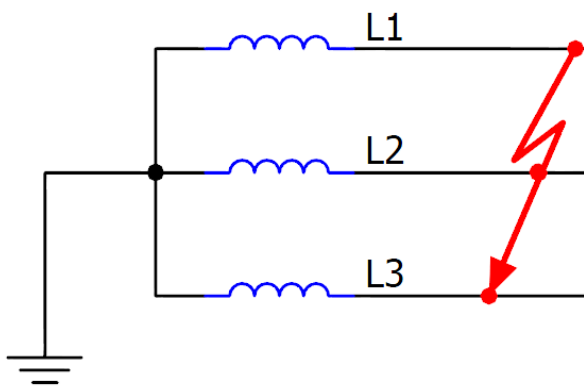
Obr. 12 Dvoufázový zemní zkrat

Velikost dvoufázového zemního zkratu určuje sousledná, zpětná a nulová složka zkratové impedance soustavy. Rovněž u tohoto typu zkratu může být velikost proudu vyšší než u trojfázového zkratu.

Výše popsané druhy zkratů se řadí mezi tzv. nesouměrné zkraty. Pokud počítáme hodnoty pro tyto druhy zkratů, zjednodušíme je použitím metody souměrných složek. [10]

4.1.1.4 Trojfázový zkrat

Nastává při vodivém spojení všech fází elektrického obvodu. Vzniká ve všech typech sítí. Všechny tři fáze vedou v tomto případě stejný zkratový proud. Trojfázový zkrat vzniká postupně z dvoufázového zkratu (např. když oblouk prohoří izolaci kabelu).



Obr. 13 Trojfázový zkrat

Velikost trojfázového zkratového proudu je určena pouze souslednou složkou zkratové impedance. Tento typ zkratu se vyskytuje nejčastěji v kabelových vedeních a zkratový proud zde bývá největší.

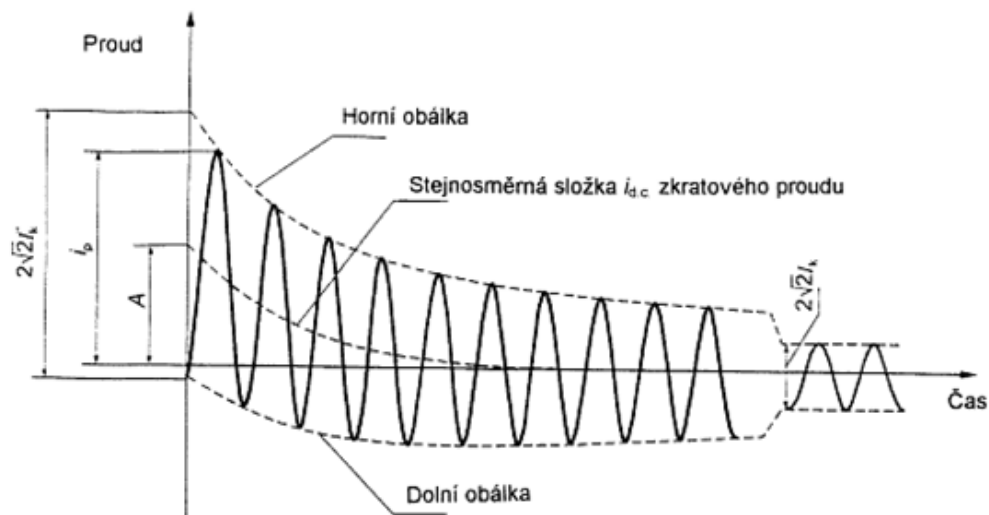
Trojfázový zkrat řadíme mezi souměrné zkraty. Tento souměrný zkrat působí na elektrickou soustavu symetricky. [10]

4.1.2 Průběh zkratového proudu

Pokud chceme znázornit průběh zkratového proudu, je nutné jej rozdělit na elektricky blízký a elektricky vzdálený zkrat.

4.1.2.1 Elektricky blízký zkrat

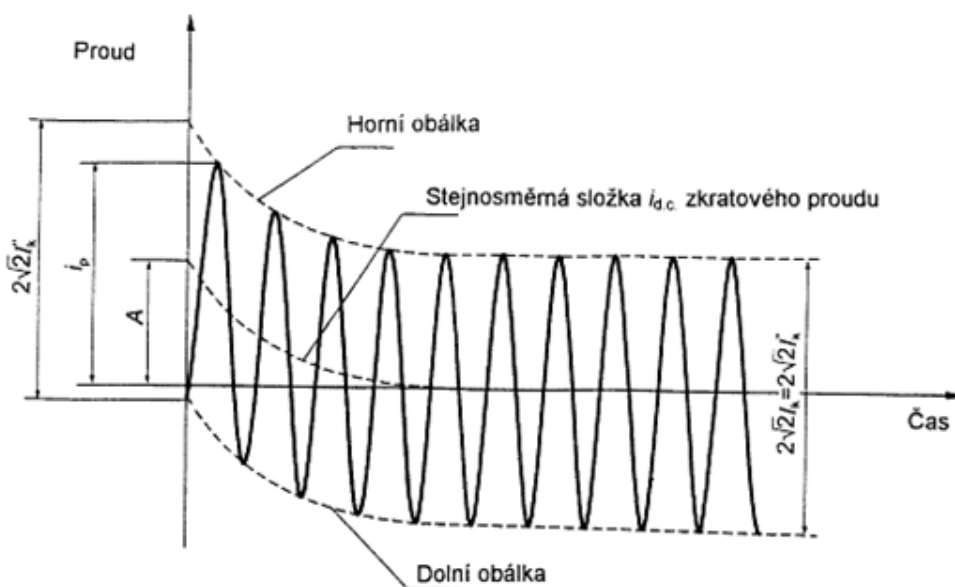
Je takový, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu generátoru, nebo příspěvek asynchronních a synchronních motorů překračuje 5 % I_K'' bez motorů. [10]



Obr. 14 Časový průběh elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou [10]

4.1.2.2 Elektricky vzdálený zkrat

Souměrná složka zůstává u elektricky vzdáleného zkratu v podstatě konstantní.



Obr. 15 Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou [10]

Popis veličin je pro elektricky vzdálený i blízký zkrat stejný:

I_K''	počáteční souměrný rázový zkratový proud: Efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci	
i_p	nárazový zkratový proud: Maximální možná okamžitá hodnota zkratového proudu, je závislá na okamžiku, kdy ke zkratu dojde	
I_K	ustálený zkratový proud: Efektivní hodnota zkratového proudu po odeznění všech přechodových jevů	
$i_{d.c.}$	stejnoseměrná složka zkratového proudu: Vzniká pouze pokud zkrat nastane při průchodu napětí nulou	
A	počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$	[10]

Pro analýzu rizik při vzniku elektrického oblouku hledáme maximální zkratový proud a z výše uvedeného textu je patrné, že ne vždy se maximální zkratový proud vyskytuje při trojfázovém symetrickém zkratu. Většinou je tedy nutné vyšetřit všechny možnosti a výsledné údaje pak závisejí na charakteru napájecí a nadřazené sítě.

4.2 Výpočet maximálního zkratového proudu

Pro určení maximálních (i minimálních) zkratových proudů je nutné přijmout některé předpoklady a zjednodušení:

- Typ zkratu je po dobu jeho trvání nemění tzn. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratem mezi fází a zemí
- V průběhu zkratu nedochází k žádným změnám v síti
- Impedance transformátorů se uvažují pro přepínače odboček v základní poloze. Je to možné díky zavedení korekčního součinitele pro impedance K_T pro síťové transformátory
- Neuvažují se odpory elektrického oblouku vzniklého při zkratu
- Zanedbáváme všechny kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě

Je zřejmé, že po akceptování těchto zjednodušení nebudou výsledky odpovídat zcela přesně skutečnosti, nicméně výpočty takto dosažené jsou pro naši potřebu dostatečně přesné. [10]

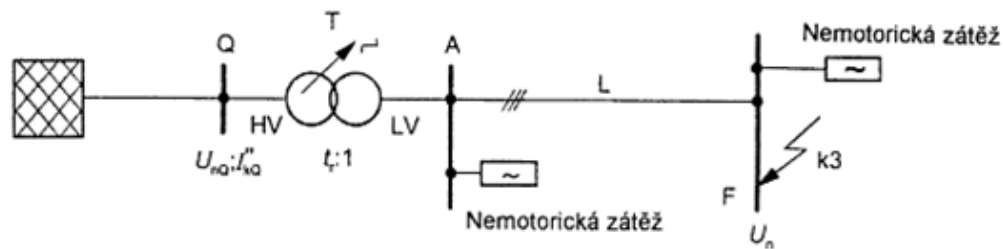
Pokud je potřeba určit zkratové proudy v soustavách s různými napěťovými hladinami, přepočítáváme hodnoty impedancí na jednu společnou napěťovou hladinu. Většinou na tu, ve které určujeme zkratový proud. Toto se provede tak, že impedance zařízení ve vyšších resp. nižších napěťových hladinách musí být vyděleny resp. vynásobeny čtvercem jmenovitého převodu transformátoru t_f . Rovněž napětí a proudy se přepočtou pomocí t_f . [10]

4.2.1 Metody výpočtu

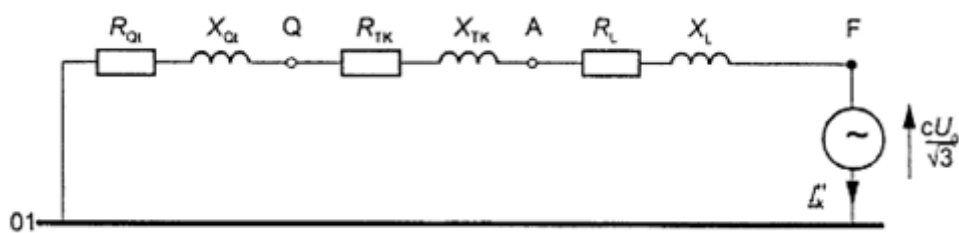
Základní metody pro výpočty zkratových proudů jsou metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu a použití souměrných složek. [10]

4.2.1.1 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Při této metodě se v místě zkratu uvažuje ideální napěťový zdroj. Tento zdroj se bere jako jediný v počítané síti. Ostatní prvky sítě (síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje) jsou nahrazeny svou vlastní vnitřní impedancí. [10]



Obr. 16 Schéma soustavy s ekvivalentním napěťovým zdrojem [10]



Obr. 17 Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy [10]

Obrázky 16 a 17 nám znázorňují použití této metody při výpočtu I_K'' . Pro výpočet je nutné určit napěťový součinitel c .

$$c = \frac{E}{\frac{U_s}{\sqrt{3}}} = \frac{E \cdot \sqrt{3}}{U_s} (-) \quad (6)$$

Tento součinitel nám udává poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitého sdruženého napětí soustavy, vydělené $\sqrt{3}$. Většinou jej nepočítáme, ale použijeme součinitele uvedené v normě ČSN EN 60909-0 viz tabulka 8. [10]

Tabulka 8 Hodnoty napěťového součinitele c pro sítě vn a nn[10]

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	Minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100V až 1000 V (IEC 6038, tabulka III)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

¹⁾ $c_{\max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max}U_n=U_m$ nebo $c_{\max}U_n=0.90 \times U_m$

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6% například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%

Při stanovování součinitele c dle tabulky 8, předpokládáme, že se skutečné napětí nebude lišit na straně vyššího napětí o více než +5% a na straně nižšího napětí o více než +10% od jmenovitého napětí soustavy. [10]

4.2.1.2 Metoda souměrných složek

Pokud použijeme při výpočtech souměrné složky, výpočet tím značně zjednodušíme. S touto metodou dosahujeme přijatelné přesnosti. Princip metody spočívá v tom, že

proudy v jednotlivých fázích se zjistí superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- Proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$
- Proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$
- Proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$

Proudy v jednotlivých fázích pak budou rovny:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (7)$$

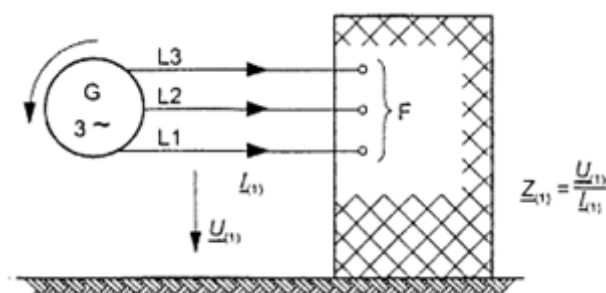
$$\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (8)$$

$$\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (9)$$

kde

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}; \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \quad (10)$$

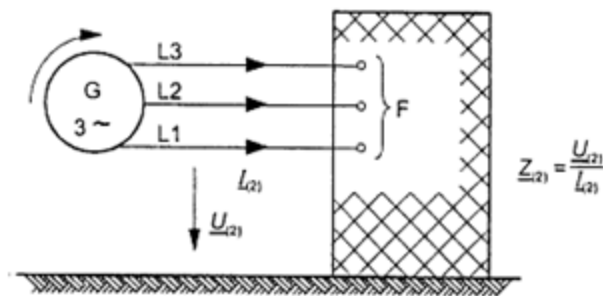
Pokud přiložíme do místa zkratu F souměrnou soustavu napětí v odpovídajícím pořadí (kladném), můžeme určit souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ (obr. 18). [10]



Obr. 18 Sousledná složka zkratové impedance [10]

Synchronní a asynchronní stroje jsou v tomto případě nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

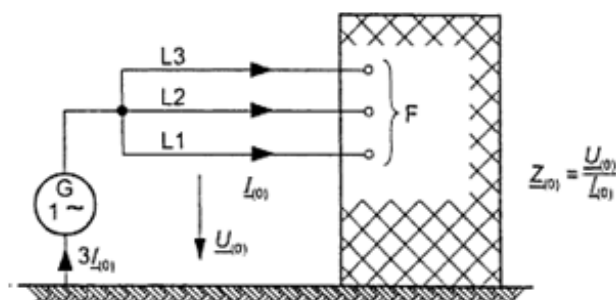
Podle obrázku 19 určíme zpětnou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(2)}$. Souměrná soustava je tentokrát vložena do místa zkratu v záporném pořadí fází.



Obr. 19 Zpětná složka zkratové impedance [10]

Velikosti sousledných a zpětných impedancí se mohou lišit pouze v případě točivých strojů. Při výpočtu elektricky vzdálených zkratů je možné uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

Netočivou zkratovou impedanci určíme tak, že do místa zkratu vložíme střídavé napětí pomocí tří zkratovaných vodičů a zpětné vedení (např. zemnicí soustavu, nulový vodič, zemnicí vodiče, stínění kabelu a plášť). [10]



Obr. 20 Netočivá složka zkratové impedance [10]

4.2.2 Podmínky výpočtu maximálního zkratového proudu

Pro výpočet maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pokud neexistuje příslušná národní norma, musí se použít napěťový součinitel c_{\max} podle tabulky 8
- Konfigurace soustavy musí být vybrána tak, aby příspěvky z napájecích bodů vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- Použijeme-li ekvivalentní impedanci \underline{Z}_0 , která bude reprezentovat vnější síť, musíme dále použít minimální zkratovou impedanci reprezentující maximální příspěvek od síťových napáječů
- Musí se zde zahrnout příspěvek asynchronních vn motorů, příspěvek asynchronních motorů nn se může zanedbat, je-li jejich příspěvek menší

než 5% počátečního zkratového proudu počítaného bez příspěvku od těchto motorů

- Statické měniče napájející pohony (např. válcovací stolice) se uvažují pouze při trojfázových zkratech, pokud v době zkratu probíhá rekuperace energie z těchto pohonů zpátky do sítě
- Rezistence venkovních vedení a kabelů se uvažují při teplotě 20 °C [10]

4.2.3 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_K''

Nejdůležitější hodnotou, která je potřebná zejména pro stanovení proudu procházejícího obloukem je počáteční souměrný rázový zkratový proud I_K'' . Hledáme druh zkratu, při kterém má tento proud nejvyšší hodnotu.

V běžných případech se vyskytne největší hodnota I_K'' u trojfázového zkratu. Platí zde, že $\underline{Z}_{(0)}$ je větší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$. V případech, kdy bude $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(1)}$ (zkraty v blízkosti transformátorů s nízkou netočivou impedancí), vyskytne se největší hodnota počátečního rázového zkratového proudu I_{KE2E}'' u dvoufázového zemního zkratu. [10]

4.2.3.1 Trojfázový zkrat

Při trojfázovém zkratu se souměrný rázový zkratový proud počítá podle rovnice 11.

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_K^2 + X_K^2}} \quad (11)$$

V tomto výpočtu se v místě zkratu zavádí ekvivalentní napěťový zdroj se součinitelem c_{\max} dle tabulky 8. [10]

4.2.3.2 Dvoufázový zemní zkrat

U tohoto typu zkratu rozlišujeme při výpočtu proudy I_{K2EL2}'' , I_{K2EL3}'' a I_{KE2E}'' . Při výpočtu vzdálených zkratů, kdy je $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ a zároveň je $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$ bude mít proud I_{KE2E}'' největší hodnotu ze všech možných počátečních rázových zkratových proudů (největší ze všech možných druhů zkratů). Tento proud pak určíme z rovnice 12.

$$\underline{I}_{KE2E}'' = - \frac{\sqrt{3} c U_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (12)$$

I_{KE2E}'' prochází zemí nebo zemními vodiči. [10]

4.2.3.3 Jednofázový zkrat

Při jednofázovém zkratu vypočítáme počáteční rázový zkratový proud podle rovnice 13.

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (13)$$

V případě, že je $\underline{Z}_{(0)}$ než $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ je při jednofázovém zkratu tento proud větší než počáteční rázový zkratový proud u trojfázového zkratu, ale menší než I_{KE2E}'' . Nicméně bude proud I_{K1}'' největší, který bude vypnut vypínačem, za předpokladu, že platí $1,0 > \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} > 0,23$. [10]

Součástí analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku by měla být zkratová analýza. Z této zkratové analýzy nás nejvíce zajímá právě hodnota I_K'' (dle IEEE 1584 – 2002 I_{bf}). Jakmile určíme druh zkratu, při kterém vzniká nejvyšší hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu, dosadíme jeho hodnotu do rovnice 1 resp. 2. Tím získáme hodnotu pro proud procházející elektrickým obloukem I_a . V praxi se nejvyšší hodnota nárazového zkratového proudu většinou vyskytuje při trojfázovém v některých případech při jednofázovém zkratu.

5 Stanovení doby vypnutí poruchy pro účely analýzy rizik

Společně se stanovením proudu, který protéká elektrickým obloukem při poruše, je čas, za který dojde k úplnému vybavení ochran nejdůležitějším parametrem při tvorbě analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku.

Tato hodnota, stejně jako velikost proudu obloukem, přímo ovlivňuje množství energie uvolněné při incidentu. Nejen z tohoto hlediska je nezbytně nutné správné nastavení ochran.

Celkový čas, za který ochrana úplně vypne poruchu, se skládá z:

- času nastaveného na ochraně (zpoždění)
- času, za který ochrana přijme a zpracuje informaci o poruše (reakční čas)
- času samotného působení vypínače do úplného uhašení elektrického oblouku

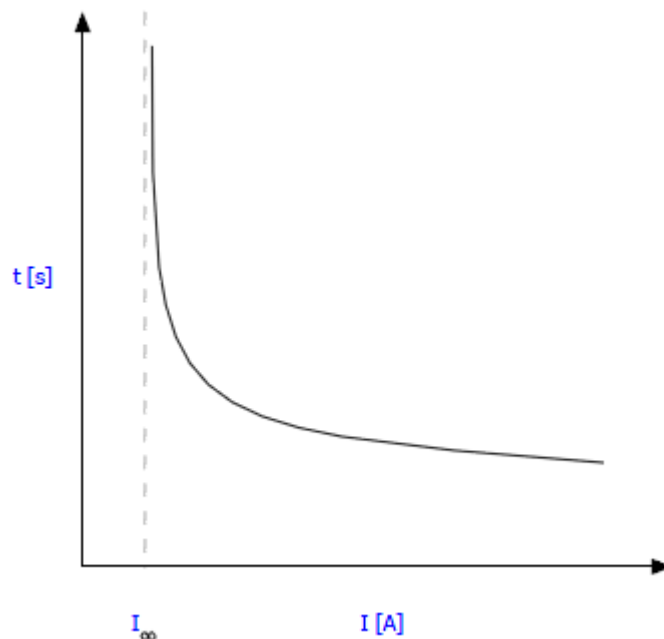
V této kapitole se budeme zabývat výhradně nadproudovými ochranami. [9]

5.1 Používané charakteristiky nadproudových ochran

Vypínací charakteristiky dělíme do dvou skupin. První skupinou časově závislé a druhou časově nezávislé.

5.1.1 Časově závislá charakteristika

Používá se pro ochranu před přetížením. Přetížení je definováno jako zatěžování vodičů proudem větším než je proud jmenovitý.



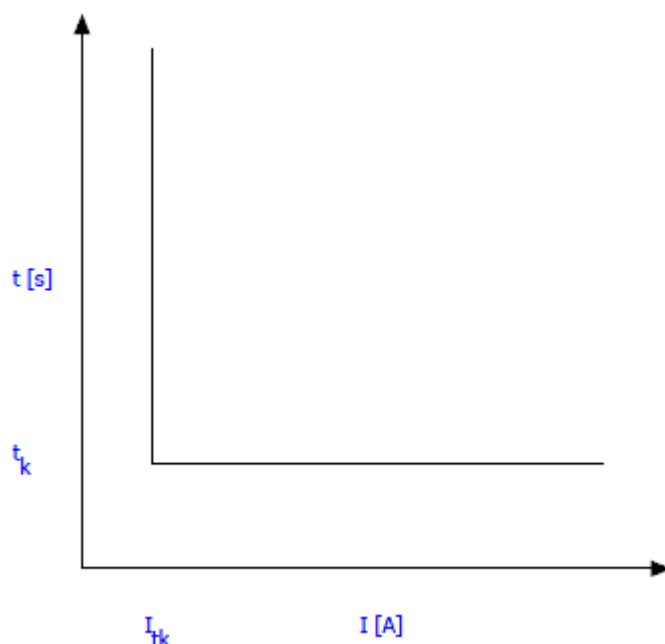
Obr. 21 Časově závislá charakteristika nadproudové ochrany

Čas vybavení ochrany se v tomto případě zmenšuje s rostoucím proudem, který způsobuje přetížení. Rozeznáváme několik druhů časově závislých charakteristik:

- normálně inverzní
- velmi inverzní
- extrémně inverzní
- dlouhodobě inverzní [11]

5.1.2 Časově nezávislá charakteristika

Časově nezávislá charakteristika reaguje vypnutím okamžitě při překročení nastaveného proudu I_{tk} .



Obr. 22 Časově nezávislá charakteristika nadproudové ochrany

Ke správnému nastavení časově nezávislých ochran je nutné znát minimální zkratový proud. Tento proud se určuje z dvoufázového izolovaného zkratu. Vybavovací proud I_{tk} , který je nastaven na ochraně musí být vždy menší než hodnota minimálního zkratového proudu I_{2k}'' , aby bylo zajištěno správné zareagování ochrany. [10, 11]

Pro potřeby analýzy je důležitá časově nezávislá charakteristika, protože právě ta vypíná zkratové proudy. U přetížení nedochází ke vzniku elektrického oblouku. Tento typ nadproudu pouze přetěžuje vedení.

5.2 Typy ochran

V této podkapitole si rozebereme druhy ochran, které jsou použity v konkrétním projektu, který je součástí závěrečné kapitoly praktického provedení analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku na konkrétní prvky napájecí sítě. Jsou zde použity moduly ochran firmy ABB řady 650, 630 a 615.

5.2.1 Třífázová nadproudová ochrana (50,51)

Třífázovou nadproudovou ochranu lze nastavit ve třech stupních.

5.2.1.1 Ochrana proti přetížení (IDMT)

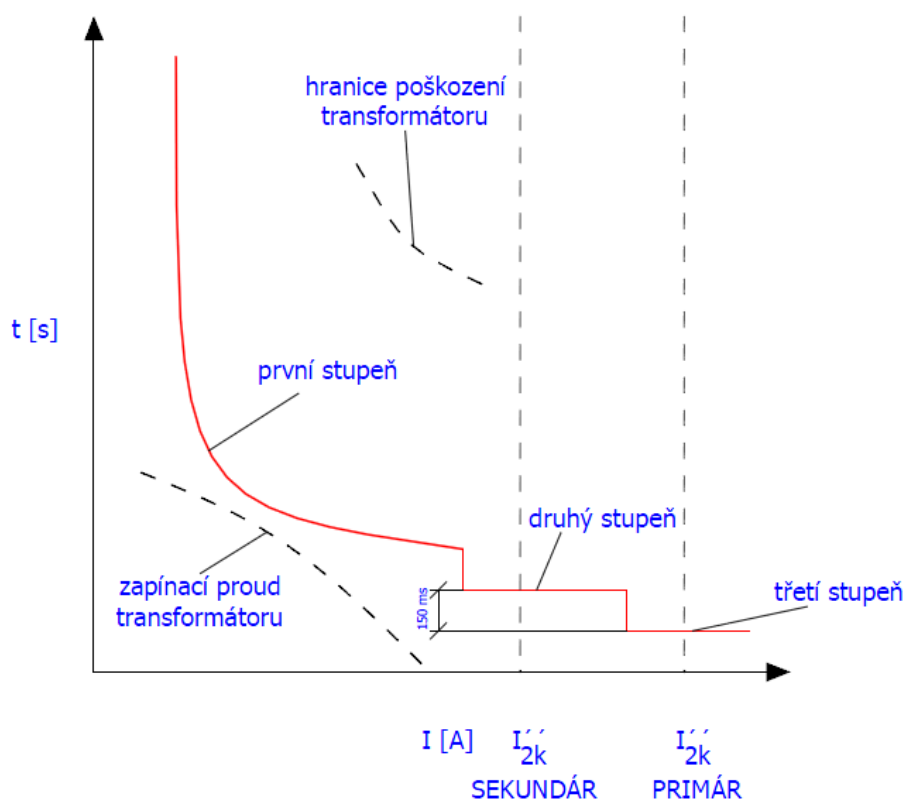
Jedná se o první stupeň ochrany, který pro svou funkci používá časově závislé charakteristiky. Zde jsou ochrany nastaveny tak, aby 20 % přetížení vypla v rozmezí 10 – 20 s. Tohoto je dosaženo vhodnou volbou typu charakteristiky (viz. 5.1.1.) a časovým koeficientem. [11]

5.2.1.2 Zkratová ochrana

Druhý stupeň ochrany je určen pro chránění sekundární strany transformátoru proti zkratu. Využívá časově nezávislé charakteristiky. Hodnota vybavovacího proudu je dána dle 5.1.2. [11]

5.2.1.3 Zkratová mžiková ochrana

Třetí stupeň ochrany se nastavuje na nejnižší možný čas zareagování ochrany, přičemž nastavení vybavovacího proudu se řídí stejnými pravidly jako u zkratové ochrany. [11]



Obr. 23 Charakteristiky třífázové nadproudové ochrany

Obrázek 23 nám znázorňuje nastavení transformátorových ochran. Vypínací charakteristika časově závislá i nezávislá (všechny stupně) musí ležet mezi charakteristikou reprezentující zapínací proud transformátoru a charakteristikou poškození transformátoru. Důvod je zřejmý, pokud by vypínací charakteristika ležela pod zapínacím proudem docházelo by při zapnutí transformátoru k nežádoucímu vybavení ochran. V opačném případě tzn. pokud by charakteristika ležela moc vysoko, hrozí poškození transformátoru nadproudem. [11]

Jak již bylo uvedeno výše třetí stupeň se nastavuje na minimální dobu, za kterou je ochrana schopna reagovat. Časový rozestup mezi třetím a druhým stupněm musí být minimálně 150 ms. Tuto hodnotu je nutno respektovat. Reprezentuje totiž časovou prodlevu, která zajistí, že třetí stupeň ochrany bezpečně vypne poruchu před stupněm druhým. Tato hodnota je uvedena v projektové dokumentaci společně se všemi nastaveními ochran. [9, 11]

Popis obrázku nastavení ochran je vysvětlen pro chránění transformátorů. Charakteristiky nadproudových ochran určených pro kabely jsou podobné, neobsahují však třetí stupeň. Pro analýzu rizik při vzniku elektrického oblouku se kabely neuvažují. Nepředpokládá se totiž, že vznik elektrického oblouku na kabelových systémech ohrozí pracovníky, protože kabely jsou po většinou uloženy v zemi.

5.2.2 Zemní proudová ochrana (50, 51G/N)

Používá se pro chránění uzemněných sítí. Ke správnému nastavení ochrany se používá minimální hodnota jednofázového zkratového proudu I_{Ik}'' . Pro správnou funkci této ochrany je nutné řádné uzemnění sítě.

Ochranu je možné nastavit ve dvou stupních. Na rozdíl od třífázové nadproudové ochrany se zde využívá pouze nezávislých charakteristik. Uplatňujeme zde tedy zkratovou ochranu jako první resp. mžikovou zkratovou ochranu jako druhý stupeň.

Princip funkce a používané charakteristiky jsou stejné jako u třífázové ochrany popsané výše.

Za zmínku stojí ještě fakt, že značení G nebo N odpovídá:

G – nadproud je měřen přímo pomocí součtových transformátorů

N – nadproud je vypočítáván

[11]

Z výše uvedeného textu vyplývá, že určení doby, která je potřebná pro vypnutí poruchy, je závislé na minimálních hodnotách zkratových proudů, ze kterých se následně určí

nastavení ochran. Toto nastavení bude závislé na typech ochran použitých v dané síti a na tom jak rychle dokáží vybavit poruchy (zkraty). Z nastavení ochran následně určíme skutečný čas vypnutí poruchy a tuto hodnotu použijeme v analýze pro výpočet energie uvolněné při incidentu.

6 Provedení analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku na konkrétní prvky průmyslové sítě

Tato kapitola je věnována praktickému výpočtu analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku.

K výpočtu byla vzata rozvodná síť napájející černouhelný hlubinný důl v Austrálii. Tento hlubinný důl je napájen z distribuční soustavy o jmenovitém napětí 66kV. Zde se ve dvou hlavních rozvodnách toto napětí transformuje na napětíovou hladinu 11kV. Transformátory napájející důl jsou identické a mají zdánlivý výkon 30MVA. Regulace napětí zde probíhá pomocí přepínání odboček na primární straně jednotlivých transformátorů. Těmito transformátory je napájena hlavní rozvodna, která je rozdělena na dvě přípojnice spojené podélným spínačem. Dále je síť rozvedena do podružných rozvodnic, které slouží k napájení jednotlivých provozů a technologií. Napětí je zde podle potřeby transformováno na 1 kV, 0,69kV, 0,415 kV. [9]

Pro tuto síť existuje zkratová analýza a v návaznosti na ni je také zpracována analýza rizika při vzniku elektrického oblouku.

Zde si ukážeme pomocí volně dostupného online software výpočet na vybraných prvcích této sítě a výsledek porovnáme s výsledky prezentované ve zprávě o analýze rizika při vzniku elektrického oblouku této sítě.

6.1 Software pro výpočet

Existuje velké množství software pro výpočet hodnot potřebných pro analýzu rizika při vzniku elektrického oblouku. Většinou jsou tyto softwary koncipovány zároveň jako projektové, v nichž je možnost výpočtu zkratových poměrů v projektované síti. Z těch nejznámějších jsou to PowerFactory, EasyPower nebo ArcFlashAnalytic. Poté existuje druhá skupina software, který je tzv. tabulkový. Tyto programy neumožňují tvorbu elektrických schémat a výpočty zkratových poměrů. Předpokladem pro použití těchto programů je znalost parametrů, které jsou potřebné pro analýzu. Programy existují jako volně šiřitelné nebo placené aplikace nebo software dostupný online.

Pro náš výpočet použijeme volně dostupný online tabulkový software. [12]

Arc Flash Calculator

Calculation of arc flash incident energy and protection boundary in accordance with IEE Std. 1584 'IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations'.

System Details

Voltage (kV): Three Phase Fault (kA):

Arching Time (s): Grounding:

Equipment Details

Conductor Gap (mm): Equipment Type:

Arc Flash

Distance to Person (mm): Protection Boundary Incident Energy (J/cm²):

Obr. 24 Prostředí volně dostupného online software [12]

Na obrázku 24 vidíme okno online programu, který je dále použit pro výpočet. Jednotlivé parametry zde dosazené znamenají:

Voltage

Jmenovité napětí soustavy, pro kterou je analýza prováděna. Zde je dobré poznamenat, že výpočetní metoda (kapitola 3) dle IEEE1584-2002 je dobře použitelná pro napěťové hladiny v rozmezí 0,207 – 15 kV. Pro hodnoty vyšší než 15 kV je vhodné provádět výpočty dle metody Ralph Lee. Tato metoda se liší vzorcem pro výpočet energie uvolněné při zkratu. Lee uvádí:

$$E = 2,142 \cdot 10^6 \cdot V \cdot I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (14)$$

kde

E	uvolněná energie (J/cm ²)
V	jmenovité napětí
I_{bf}	souměrný rázový zkratový proud (I_K')
t	čas hoření oblouku (s)
D	vzdálenost mezi obloukem a osobou (mm)

Pro napětí nad 15 kV se uvažuje proud obloukem rovný proudu I_K'' . [8, 9]

Archiving Time

Doba hoření elektrického oblouku tzn. doba trvání poruchy. Na napětových hladinách, pro které je praktický výpočet proveden, jsou použity tyto moduly ochran:

- 66 kV – REC650
- 11kV – REF630
- 0,415 kV – REF615

Tento čas je složený podle popisu v kapitole 5.

$$\text{celkový čas poruchy} = \text{zpoždění} + \text{reakční čas} + \text{působení vypínače}$$

Tabulka 9 Reakční čas ochran [9]

Modul	Zpoždění [ms]
REx650	30
REF630	30
REF615	30

Tabulka 10 Doba vypnutí vypínače garantovaná výrobcem [9]

Napětová hladina [kV]	Zpoždění [ms]
66	90
11	90
0,415	30

Zpoždění jednotlivých ochran je bráno z jejich nastavení, určeného při návrhu sítě.

Conductor Gap

Vzdálenost mezi vodiči je pevně dána konstrukčním provedením jednotlivých zařízení. Zde je opět dobré zmínit, že dle IEEE 1584 – 2002 je možné empirický model zde uvedený, použít do hodnoty 152 mm. Pokud je hodnota vyšší je vhodné použít metodu dle Ralpa Lee.

Distance to person

Vzdálenost osoby a oblouku zde byla určována individuálně dle použitých rozvodů s přihlédnutím k tomu, kde se může vyskytnout elektrický oblouk vzhledem k pracovníkovi. Ve většině případů bylo toto konzultováno přímo s výrobcem.

Grounding

Zemnění sítě se zadává jako:

- grounded – uzemněná síť
- ungrounded – izolovaná síť
- high resistance – síť uzemněná přes velkou impedanci

Equipment Type

Typ zařízení se zadává dle:

- Open Air – 66 kV (hybridní rozvodny PASS)
- Switchgear – 11 kV (VN rozváděče ZS1)
- MCC – 0,415 kV (NN rozváděče MNS)
- Custom made board – není ve výpočtu použito (jedná se o ostatní zařízení) [9]

Three Phase Fault

Největší hodnota zkratového proudu I_K'' . Podrobně rozebráno v kapitole 4.

Protection Boundary Incident

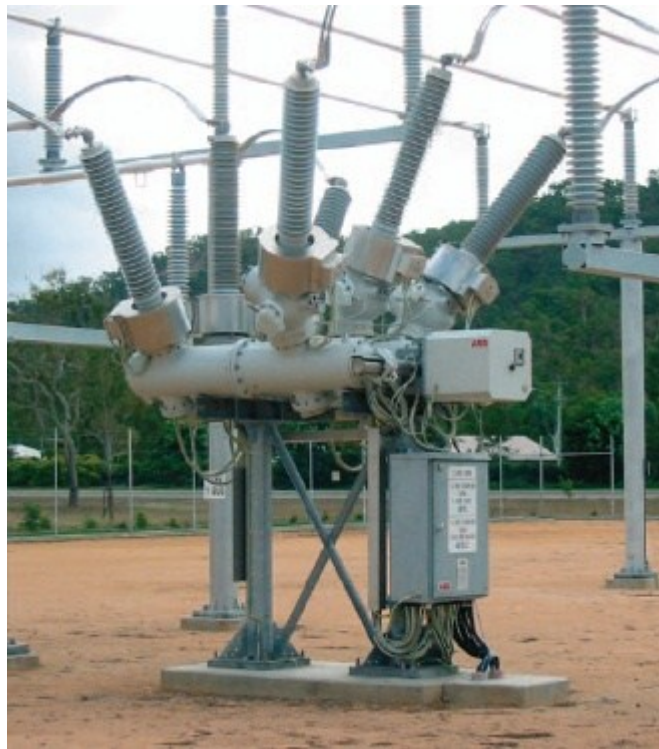
Hodnota energie pro nebezpečí vzniku popálenin druhého stupně. Projekt i simulace počítá s hodnotou $1,2 \text{ cal/cm}^2$ (5 J/cm^2 pro normy USA).

6.2 Praktický výpočet

Ukázka výpočtu je provedena na různých napěťových hladinách, které byly vybrány pro názornost. Výsledky jsou porovnány s výpočty provedenými v profesionálním software PowerFactory projektanty výše popsané napájecí sítě černouhelného hlubinného dolu.

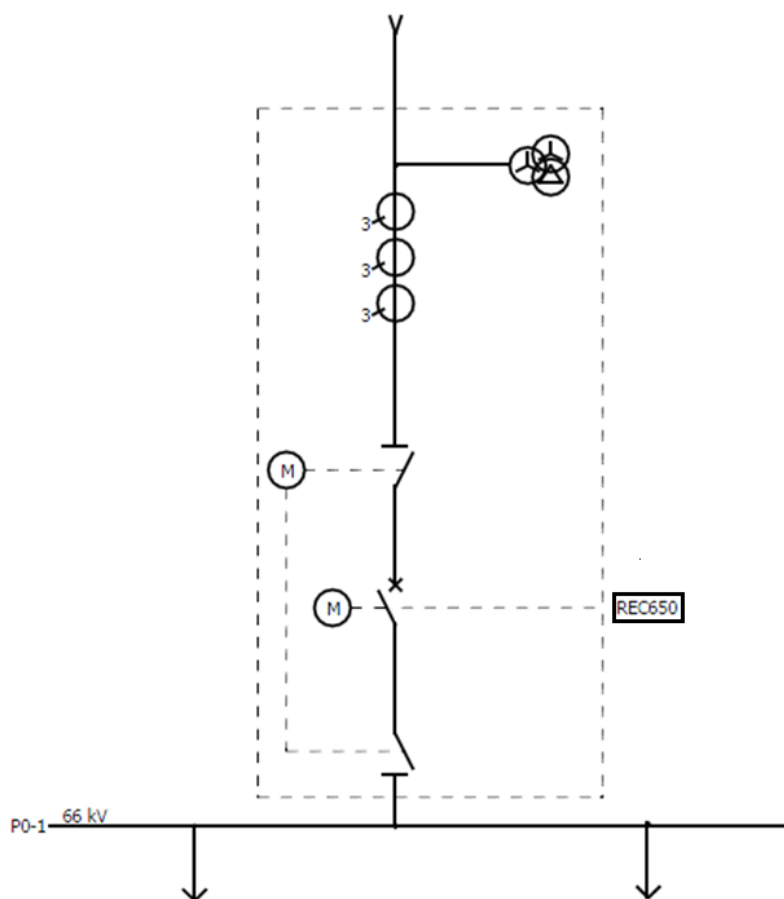
6.2.1 Hladina 66 kV

Hladina 66 kV je osazena moduly typu PASS firmy ABB. Praktická ukázka výpočtu se týká právě těchto modulů viz. obrázek 25.



Obr. 25 Modul typu PASS[13]

Zde jsou integrovány ochrany, vypínač, odpojovače, uzemňovače a měřicí proudové a napěťové transformátory. Jako dielektrikum je zde používán fluorid sírový (SF_6). Tyto moduly jsou koncipovány pro použití na napěťových hladinách do 252 kV. [13]



Obr. 26 Modul typu PASS na hladině 66 kV

Ve výpočtu uvažujeme, že elektrický oblouk zde může vzniknout na výstupní straně z modulu. Ohrožení jsou v tomto případě pracovníci vyskytující se pod výstupními přípojnícemi. Nejkratší vzdálenost, která může být mezi osobou (hlava) a elektrickým obloukem vzniklým při poruše byla stanovena právě pro tento případ.

Doba vypnutí poruchy je zde 120 ms. Ochrana zde použitá (REC650), umožňuje nastavit okamžitou vypínací reakci na zkratový proud (0 ms). Zadávaná hodnota tedy reprezentuje pouze reakční čas ochrany a čas působení vypínače. [9]

Zbylé zadávané parametry vycházejí z použité technologie a jejich získání je popsáno výše.

Tabulka 11 Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 66kV

Parametr	Jednotka	Hodnota
Voltage	[kV]	66
Arching time	[s]	0,12
Conductor gap	[mm]	1500
Distance to person	[mm]	1380
Three phase fault	[kA]	8,63
Grouding	[-]	Ungrounded
Equipment type	[-]	Open Air
Protection boundary incident	[J/cm ²]	5

Arc Flash Calculation



Calculation Results

Distance factor, $x = 2.000$

Arcing Current = 8.4 kA

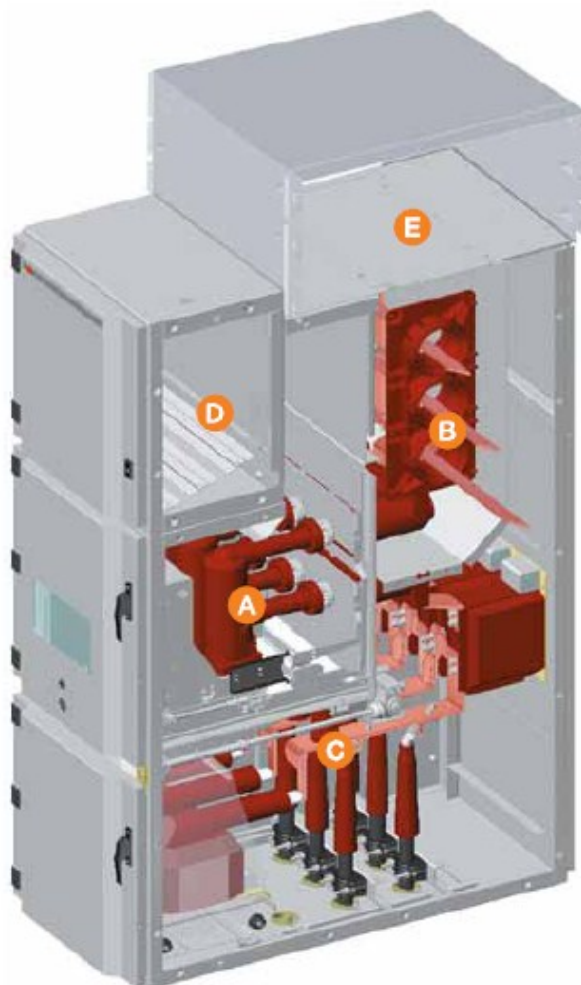
Incident Energy = 76.88J/cm² [= 18.37 cal/cm²]

Flash Protection Boundary = 5411 mm

Obr. 27 Výstup výpočtu na hladině 66 kV [12]

6.2.2 Hladina 11 kV

Přípojnicový systém na napěťové hladině 11 kV je tvořen rozvaděčovými moduly UniGear ZS1. Jedná se o kryté VN rozváděče pro vnitřní použití.



Obr. 28 Řez rozváděčem UniGear ZS1 [14]

UniGear ZS1 se používají pro aplikace do 24 kV a až do jmenovitého proudu 4000 A. Všechny manipulace se zde provádějí z přední strany. Rozváděče jsou izolovány vzduchem a vnitřní prostory jsou od sebe navzájem izolovány přepážkami. Dle obrázku 27 jsou prostory označeny jako:

- **A** – Prostory vypínače
- **B** – Prostory přípojníc (zde jsou jednotlivé rozváděče spojeny)
- **C** – Kabelové prostory
- **D** – NN prostor
- **E** – Kompaktní kanál pro odvod horkých plynů, které jsou vyvinuty při poruše

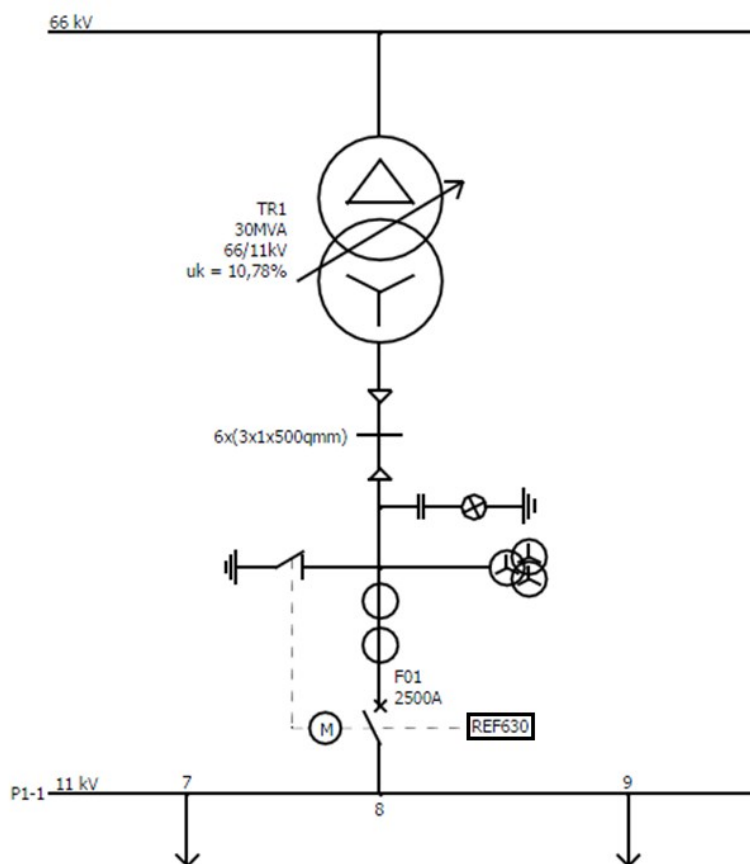
Samotné skříně ZS1 jsou odolné proti vnitřnímu obloukovému zkratu. Tuto odolnost garantuje výrobce testy provedenými dle IEC 62271-200. [14]

Tato skutečnost je pro výpočet analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku zásadní. Při výpočtu uvažujeme pouze možnost vzniku elektrického oblouku při otevřených dveřích rozváděče.

Pracovní vzdálenost (oblouk – hlava) zde byla stanovena především podle délky paže pracovníka, pracujícího na ZS1 při otevřených dveřích.

Čas vypnutí je vzat z ochrany na přívodu, nikoli z ochrany v daném vývodovém poli. Je tomu proto, že porucha může vzniknout v nadřazeném vedení před touto ochrannou a nebyla by tedy tímto přístrojem detekována. Čas zpoždění je na přívodní ochraně nastaven na 0,77 s. Celkový čas je tedy součet $0,77 + 0,30 + 0,90 = 0,89$ s

Zbylé zadávané parametry vycházejí z použité technologie a jejich získání je popsáno výše.



Obr. 29 Jedna ze dvou přípojníc v hlavní rozvodně 11 kV

Tabulka 12 Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 11 kV

Parametr	Jednotka	Hodnota
Voltage	[kV]	11
Arching time	[s]	0,89
Conductor gap	[mm]	180
Distance to person	[mm]	800
Three phase fault	[kA]	19,63
Grouding	[-]	Highrezistance
Equipment type	[-]	Switchgear
Protection boundary incident	[J/cm ²]	5

Arc Flash Calculation



Calculation Results

Distance factor, $x = 0.973$

Arcing Current = 18.83 kA

Incident Energy = 643.19J/cm² [= 153.72 cal/cm²]

Flash Protection Boundary = 9074 mm

Obr.30 Výstup výpočtu na hladině 11 kV [12]

6.2.3 Hladina 0,415 kV

Pro hladinu 0,415 kV byla vybrána podružná rozvodna napájející technologii potřebnou pro výrobu. Tato rozvodna je tvořena rozvaděčovými nízkonapěťovými systémy řady MNS.

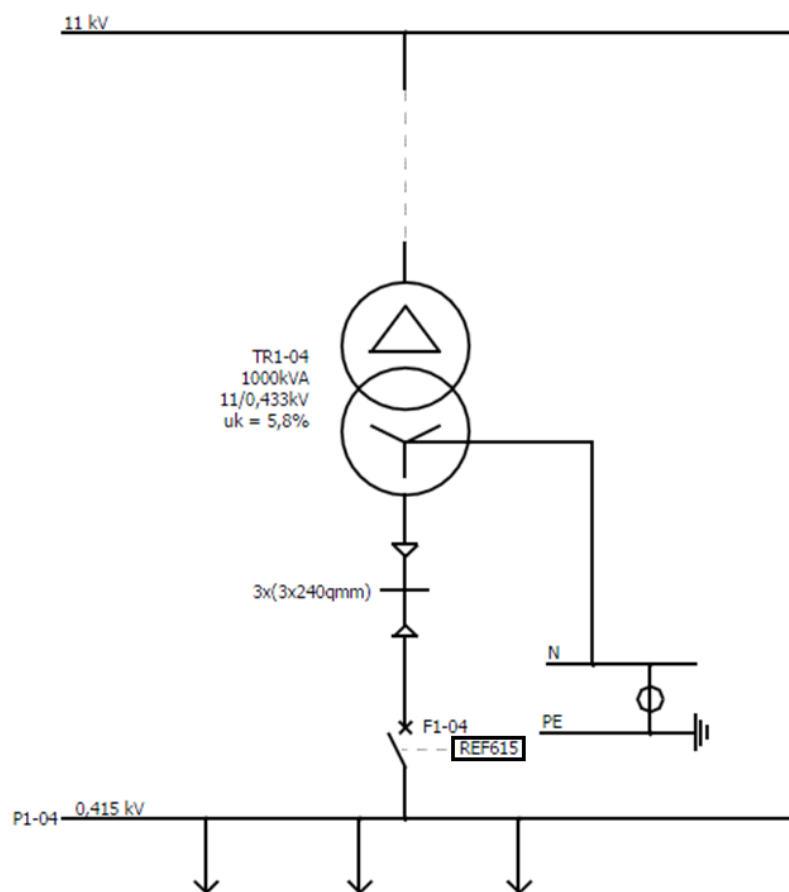


Obr. 31 Rozvaděčový systém NN MNS [15]

Tyto rozváděče se používají do jmenovité hodnoty napětí 690 V a do jmenovitého proudu 2000 A. Rovněž tyto rozvaděčové systémy jsou stejně jako v předcházejícím případě odolné proti elektrickému oblouku vzniklému uvnitř skříně. Tato odolnost je do hodnoty proudu obloukem 50 kA. Systém je velice modulární může obsahovat ochrany, MaR techniku, frekvenční měniče pro řízení pohonů aj. [15]

Výpočet zde uvažujeme stejně jako na hladině 11 kV tzn. vznik oblouku uvažujeme při otevřených dveřích rozváděče.

Čas vypnutí poruchy je opět brán z ochrany na přívodním vedení (obrázek 31).



Obr. 32 Napájení 0,415 kV pro technologii

Tabulka 13 Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 0,415kV

Parametr	Jednotka	Hodnota
Voltage	[kV]	0,415
Arching time	[s]	0,26
Conductor gap	[mm]	30
Distance to person	[mm]	500
Three phase fault	[kA]	21,38
Grouding	[-]	Grounded
Equipment type	[-]	MCC
Protection boundary incident	[J/cm ²]	5

Calculation ResultsDistance factor, $x = 1.641$

Arcing Current = 10.63 kA

Incident Energy = 33.73 J/cm^2 [= 8.06 cal/cm^2]

Flash Protection Boundary = 1600 mm

*Obr. 33 Výstup výpočtu na hladině 0,415 kV [12]***6.3 Sumarizace a porovnání s výsledky z PowerFactory**

Tabulky 14 a 15 nám ukazují výsledky dosažené jednotlivými softwary. Z výsledků je patrné, že obě simulace provedené různými programy vedou k zařazení do stejné kategorie nebezpečí, která následně určuje použití OOPP (viz. tabulka 7).

Tabulka 14 Kategorie OOPP vzhledem k uvolněné energii [9]

Uvolněná energie [cal/cm ²]	Kategorie OOPP
1,195	0
4	1
7,99	2
25	3
40	4
> 40	-1

Tabulka 15 Sumarizace výsledků z analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku

Napětíová hladina	Proud obloukem	Doba vypnutí poruchy	Uvolněná energie	Hranice pro působení elektrického oblouku	Kategorie nebezpečí
[kV]	[kA]	[s]	[cal/cm ²]	[mm]	[-]
66	8,4	0,12	18,37	5411	3
11	18,83	0,89	153,72	9074	-1
0,415	10,63	0,26	8,06	1600	3

Tabulka 16 Výsledky z programu PowerFactory[9]


Napět'ová hladina	Proud obloukem	Doba vypnutí poruchy	Uvolněná energie	Hranice pro působení elektrického oblouku	Kategorie nebezpečí
[kV]	[kA]	[s]	[cal/cm ²]	[mm]	[-]
66	8,632	0,12	18,379	5412	3
11	19,658	0,89	153,67	9071	-1
0,415	10,684	0,26	8,106	1605	3

Jediný patrnější rozdíl je mezi obloukovými proudy na hladině 66 kV. Toto je způsobeno metodami použitými ve výpočtu. PowerFactory dovoluje zadat hodnotu obloukového proudu stejnou jako je maximální hodnota I_K'' (platí pro napět'ové soustavy se jmenovitým napětím větším než 15 kV). Online software, který je použit pro výpočet v rámci této práce toto nedovoluje a proud obloukem určil dle rovnice (2).

Z výsledků na této napět'ové hladině je patrné, že výše zmíněná chyba neovlivnila výsledek energie uvolněné při poruše, která je určující pro zařazení do jednotlivých kategorií pro použití OOPP.

6.3.1 Výsledné štítky

66 kV


WARNING

RIZIKO PŘI VZNIKU ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

VYŽADOVÁNO VHODNÉ OOPP

<p><u>Ochrana proti elektrickému oblouku</u></p> <p>Kategorie nebezpečí: 3 Pracovní vzdálenost: 1380mm Uvolněná energie: 18,37 cal/cm² Hranice působení oblouku: 5411 mm</p>	<p><u>Ochranné pomůcky</u></p> <p>Přilba Brýle s bezpečnostním sklem Ochrana sluchu Kožené pracovní boty</p> <p><u>Obloukově odolné oblečení</u> Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce Obloukově odolná bunda, nepromokavá</p>
---	--

Název zařízení: P0-1

Jmenovité napětí: 66kV

Obr. 34 Štítek pro P0-1, 66kV

11 kV



DANGER


NEBEZPEČÍ VZNIKU ELEKTRICKÉHO OBLOUKU
!!! Žádné OOPP nejsou vhodné !!!

<u>Ochrana proti elektrickému oblouku</u>	<u>Obloukově odolné oblečení a OOPP</u>
Kategorie nebezpečí: -1 Pracovní vzdálenost: 800mm Uvolněná energie: 153,72 cal/cm ² Hranice působení oblouku: 9074mm	Žádné OOPP nejsou vhodné Odpojit vždy před započítím <u>práci</u> !

Název zařízení: P1-1
Jmenovité napětí: 11kV

Obr. 35 Štítek pro P1-1, 11 kV

0,415 kV



WARNING

NEBEZPEČÍ VZNIKU ELEKTRICKÉHO OBLOUKU
VYŽADOVÁNO VHODNÉ OOPP

<u>Ochrana proti elektrickému oblouku</u>	<u>Ochranné pomůcky</u>
Kategorie nebezpečí: 3 Pracovní vzdálenost: 1380mm Uvolněná energie: 18,37 cal/cm ² Hranice působení oblouku: 5411mm	Přilba Brýle s bezpečnostním sklem Ochrana sluchu Kožené pracovní boty Obloukově odolné oblečení Obloukově odolná košile (dlouhý rukáv), kalhoty nebo komplet Obloukově odolný chránič obličeje nebo kapuce Obloukově odolná bunda, nepromokavá

Název zařízení: P0-1
Jmenovité napětí: 66kV

Obr. 36 Štítek pro P1-04, 0,415 kV

Závěr

Cílem mé práce bylo seznámit odbornou veřejnost s analýzou rizika při vzniku elektrického oblouku. Tato analýza je běžnou součástí elektrotechnických projektů vznikajících v zahraničí a je vyžadována investory hlavně v USA a Austrálii. V České republice je tato analýza naprosto neznámá a česká ba ani evropská legislativa pro ni nemá oporu v normách ČSN resp. IEC.

Jádrem této analýzy je podrobný rozbor posuzované sítě a získání všech potřebných parametrů. Toto řeší norma IEEE 1584 – 2002. Právě tato norma je podrobně rozebrána v kapitole 3. Z tohoto rozboru vyplývají dva stěžejní parametry potřebné pro provedení analýzy a to nejvyšší hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu a čas, po který porucha trvá.

Velikost proudu procházejícího poruchovým obloukem se určí pomocí největšího možného počátečního souměrného rázového zkratového proudu. Tato hodnota je závislá na parametrech sítě. Ne vždy se nejvyšší hodnota vyskytne při třífázovém zkratu. Mohou nastat případy, kdy nejvyšší hodnotu bude mít jednofázový zkratový proud. Úkolem projektanta sítě je pro dané zařízení vytvořit zkratovou analýzu a použít pro výpočet vhodný druh zkratového proudu. Teoretický rozbor určení tohoto proudu je proveden v kapitole 4.

Čas, po který porucha trvá, určíme z nastavení elektrických ochran použitých v posuzované síti. Jedná se o čas, za který nadřazená ochrana úplně vypne poruchu a jeho stanovení je popsáno v kapitole 5. Tato doba nám společně s velikostí poruchového proudu určuje množství energie uvolněné při poruše. Podle velikosti této hodnoty (cal/cm^2) lze následně dle normy NFPA70E určit vhodné osobní ochranné pracovní pomůcky pro pracovníky a stanovit hranice nebezpečí přístupu k zařízení, která jsou pod napětím.

V praktické části diplomové práce byla provedena analýza rizika při vzniku elektrického oblouku na vybrané prvky distribuční sítě napájející provoz černouhelného hlubinného dolu v Austrálii. Pro tyto výpočty byl použit volně dostupný online software. Výsledky výpočtů se shodují s výsledky provedenými projektanty výše zmíněné sítě. Toto ukazuje na dobrou dostupnost softwarového vybavení, pro provádění analýzy. Nicméně nesmíme zapomínat, že pro správné provedení analýzy rizika při vzniku elektrického oblouku jsou potřeba odborné znalosti z elektrotechniky. Proto by měla být analýza prováděna výhradně odbornými pracovníky, znalými problematiky a hlavně místních poměrů v posuzované síti.

Přestože je pravděpodobné, že o analýze rizika při vzniku elektrického oblouku v našich končinách ještě dlouho neuslyšíme, je dobré se s touto problematikou seznámit alespoň rozsahem v jakém ji předkládá tato práce. Vývoj v oblasti bezpečnosti vyhledává stále nové a nové potenciální zdroje nebezpečí, a proto je dle mého názoru jen otázkou času, kdy se podobné požadavky na bezpečnost elektrických zařízení objeví i v tuzemských normách.

Použitá literatura

- [1] HAVELKA, O. *Elektrické přístroje I*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1974. 318 s.
- [2] GROSS, B. *Elektrické výboje v plynech*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1967. 137 s.
- [3] Lee, R. *The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Blast Burns*. IEEE Trans. IAS 18 (3): 246 – 251 (1892).
- [4] *Kolikdecibelů škodí. Kdy vzniká riziko poškození sluchu hlukem?*[online]. 2012. Dostupné z: <<http://www.auris-audio.cz/kolik-decibelu-skodi>>.
- [5] *Vysokonapěťový transformátor z televize*. [online]. 2005. Dostupné z: <<http://elektronika.kvalitne.cz/VN/vntvtrafo/vntvtrafo.html>>.
- [6] *Účinky tlakové vlny*. [online]. Dostupné z: <www.bozpinfo.cz/priloha/ukazka-prevence-2-dil>.
- [7] NFPA70E, *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, 2012.
- [8] IEEE 1584 – 2002, *Guide for Performing Arc – Flash Hazard Calculation*, 2002
- [9] ABB. Neveřejné firemní materiály
- [10] ČSN EN 60909-0, *Zkratové proudy v trojfázových soustavách: Část 0 – Výpočet proudů*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 64 s.
- [11] ŠERJENÍK, J. *Výpočty zkratových poměrů v průmyslové síti*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky.
- [12] *Arc Flash Calculator*. [online]. Dostupné z: <<http://myelectrical.com/tools/arc-flash-calculator>>.
- [13] ABB. *Katalog zapouzdřených, plynem izolovaných rozvodů PASS*
- [14] ABB. *Katalog rozváděčů vysokého napětí UniGear ZSI*
- [15] ABB. *Katalog rozváděčů nízkého napětí MNS*

Seznam obrázků

Obr. 1	Přehled elektrických výbojů
Obr. 2	Vznik budící energie
Obr. 3	Vznik ionizační energie
Obr. 4	Rozložení teplot na elektrickém oblouku
Obr. 5	Dynamická charakteristika elektrického oblouku
Obr. 6	Teplota kůže vystavená oblouku na 0,1 s pro různé vzdálenosti
Obr. 7	Hoření malého elektrického oblouku
Obr. 8	Příklad výstupu z analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku
Obr. 9	Ukázka štítku kategorie -1
Obr. 10	Jednofázový zkrat
Obr. 11	Dvoufázový zkrat
Obr. 12	Dvoufázový zemní zkrat
Obr. 13	Třífázový zkrat
Obr. 14	Časový průběh elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou
Obr. 15	Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou
Obr. 16	Schéma soustavy s ekvivalentním napěťovým zdrojem
Obr. 17	Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy
Obr. 18	Sousledná složka zkratové impedance
Obr. 19	Zpětná složka zkratové impedance
Obr. 20	Netočivá složka zkratové impedance
Obr. 21	Časově závislá charakteristika nadproudové ochrany
Obr. 22	Časově nezávislá charakteristika nadproudové ochrany
Obr. 23	Charakteristiky třífázové nadproudové ochrany
Obr. 24	Prostředí volně dostupného online software
Obr. 25	Modul typu PASS
Obr. 26	Modul PASS na hladině 66 kV
Obr. 27	Výstup výpočtu na hladině 66 kV
Obr. 28	Řez rozváděčem UniGear ZS1
Obr. 29	Jedna ze dvou přípojníc v hlavní rozvodně 11 kV
Obr. 30	Výstup výpočtu na hladině 11 kV
Obr. 31	Rozváděčový systém NN MNS
Obr. 32	Napájení 0,415 kV pro technologii
Obr. 33	Výstup výpočtu na hladině 0,415 kV
Obr. 34	Štítek pro P0-1, 66 kV
Obr. 35	Štítek pro P1-1, 11 kV
Obr. 36	Štítek pro P1-04, 0,415 kV

Seznam tabulek

Tabulka 1	Vztah vzdálenosti a energie oblouku
Tabulka 2	Přípustné dávky hluku
Tabulka 3	Vyjádření následků tlakové vlny
Tabulka 4	Určení tříd zařízení
Tabulka 5	Určení pracovních vzdáleností
Tabulka 6	Typické vzdálenosti a koeficient vzdáleností
Tabulka 7	OOPP dle kategorie nebezpečí
Tabulka 8	hodnoty napětového součinitele c pro sítě NN a VN
Tabulka 9	Reakční časy ochran
Tabulka 10	Doba vypnutí vypínače garantovaná výrobcem
Tabulka 11	Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 66 kV
Tabulka 12	Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 11 kV
Tabulka 13	Vstupní hodnoty pro výpočet na hladině 0,415 kV
Tabulka 14	Kategorie OOPP vzhledem k uvolněné energii
Tabulka 15	Sumarizace výsledků z analýzy rizik při vzniku elektrického oblouku
Tabulka 16	Výsledky z programu PowerFactory